



This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

- + *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
- + *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
- + *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
- + *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at <http://books.google.com/>



A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

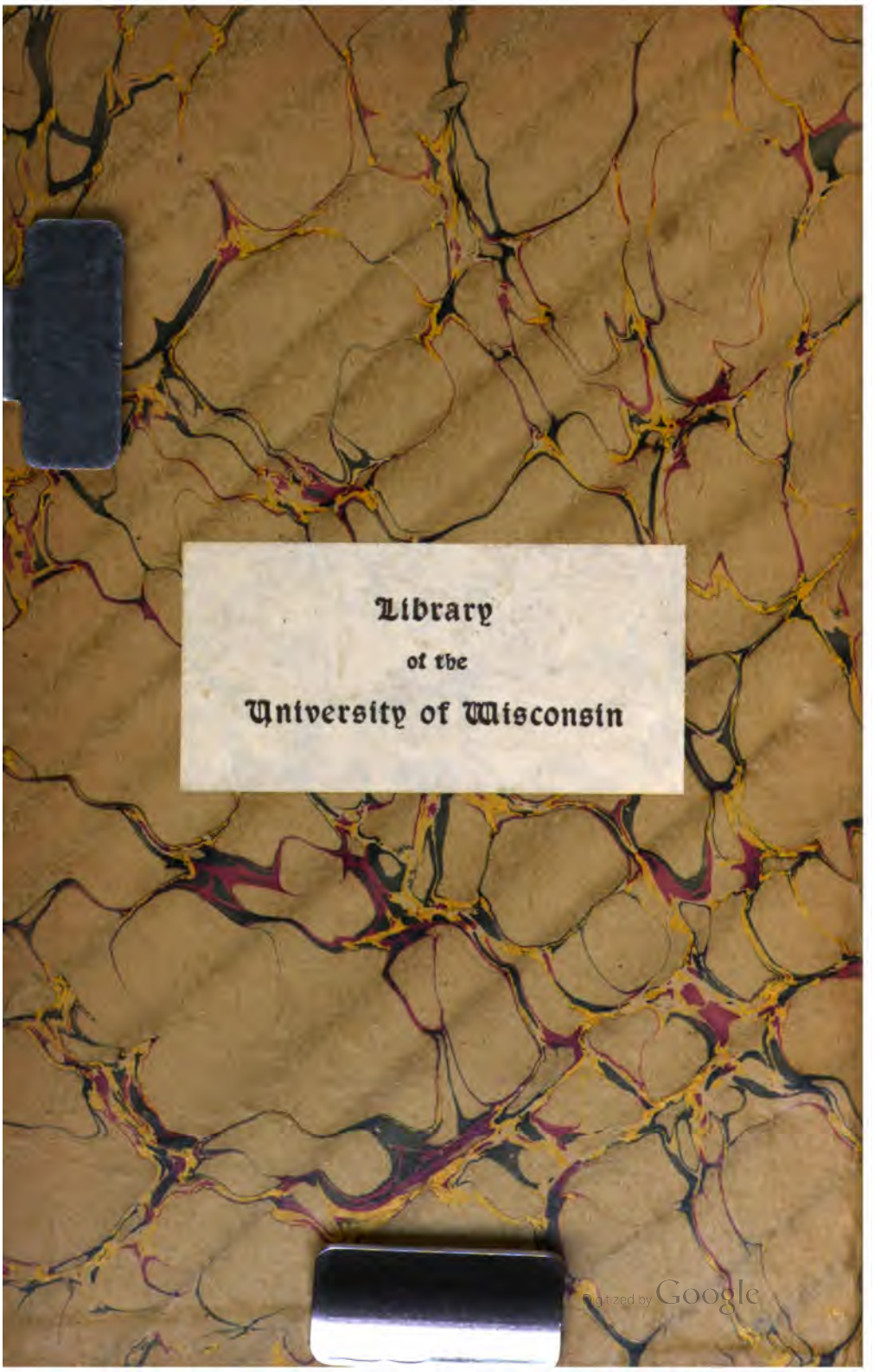
Nous vous demandons également de:

- + *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.
- + *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.
- + *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.
- + *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse <http://books.google.com>



The image shows the front cover of a book. The cover is decorated with a traditional marbled paper pattern, featuring a base of light tan or beige color with intricate, vein-like patterns in shades of yellow, purple, and dark blue. A central white rectangular label is pasted onto the cover, containing the text 'Library of the University of Wisconsin' in a black, serif font. Two metal clips are visible: one on the left edge and one at the bottom center, used to hold the book open for scanning.

Library
of the
University of Wisconsin



RECUEIL
D'EXPÉRIENCES
ÉLÉMENTAIRES
DE PHYSIQUE.

PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS,
33907 Quai des Grands-Augustins, 55.

RECUEIL D'EXPÉRIENCES

ÉLÉMENTAIRES

DE PHYSIQUE

PUBLIÉ

AVEC LA COLLABORATION DE NOMBREUX PHYSICIENS

PAR

Henri ABRAHAM,

Maître de Conférences à l'École Normale supérieure,
Secrétaire général de la Société française de Physique.

PREMIÈRE PARTIE.

TRAVAUX D'ATELIER. — GÉOMÉTRIE ET MÉCANIQUE. — HYDROSTATIQUE. — CHALEUR.



PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55.

1904

(Tous droits réservés.)

*Les droits d'auteur de cet Ouvrage sont versés
à la Société française de Physique.*

149619
JAN 21 1911
LHB
AB8

AVANT-PROPOS.

Le Conseil de la Société française de Physique m'a autorisé, l'année dernière, à faire appel aux membres de la Société pour réunir les éléments d'un *Recueil d'Expériences élémentaires de Physique*.

Un grand nombre de physiciens ont apporté leur concours à cette tentative de multiple collaboration, en envoyant aussitôt des descriptions d'expériences et des indications bibliographiques. Plusieurs professeurs ont bien voulu me communiquer les cahiers contenant le résumé des expériences faites pendant leurs cours. Qu'il me soit permis de leur exprimer à tous ma vive reconnaissance (1).

Mais le défaut de place et aussi la nécessité de donner une certaine homogénéité à cet Ouvrage m'ont empêché d'utiliser tout ce que j'avais reçu. Je pourrais citer tels de nos collaborateurs dont je me trouve avoir beaucoup réduit, ou même complètement supprimé la collaboration. Je tiens beaucoup à m'en excuser auprès d'eux.

Je dois un remerciement particulier à M. Jules Lemoine, professeur au lycée Louis-le-Grand, qui a écrit le premier Chapitre

(1) A la suite de chaque description d'expérience, des renvois à la liste des Collaborateurs et à l'index bibliographique rappellent autant que possible les sources où l'on a puisé. — Ces renvois sont imprimés en caractères ordinaires, les renvois aux autres parties de l'Ouvrage sont imprimés en caractères gras.

de ce *Recueil*. Ces *Travaux d'atelier* ont été rédigés en s'inspirant des cours de travail manuel qui ont été réorganisés à l'École Normale supérieure, avec le concours de M. A. Dufour, agrégé-préparateur à l'École. Le *travail du verre*, notamment, est le résumé des notes prises pendant les excellentes leçons de M. Berlemont.

C'est encore pour moi un agréable devoir de dire de quels soins M. Gauthier-Villars a entouré la préparation matérielle de ce livre — et avec quelle conscience MM. de Ruaz et Morel en ont fait l'illustration : les figures ont été dessinées au laboratoire, d'après nature.

C'est maintenant à nos lecteurs que nous demandons leur collaboration : nous serons heureux de recevoir leurs observations et leurs critiques.



AVERTISSEMENT.

Ce Recueil a été partagé en deux Volumes qui correspondent dans leur ensemble aux programmes des classes de *Seconde* et de *Première*. Mais les cadres de ces programmes ont été largement débordés en vue d'autres enseignements, et, notamment, en vue de la classe de Mathématiques élémentaires.

Les expériences décrites dans cet Ouvrage sont des *manipulations*. On reconnaîtra facilement, pour beaucoup d'entre elles, qu'un changement d'échelle ou l'emploi des projections peuvent les transformer en expériences de cours — et nous l'avons rappelé à plusieurs reprises.

Mais ces descriptions ne sont accompagnées d'aucune théorie. La seule incursion que nous nous soyons permise sur ce terrain a été d'attirer à tout instant l'attention du lecteur sur le degré de précision des mesures, sur l'ordre de grandeur des choses, sur la nécessité ou l'inutilité d'une correction — et sur la représentation graphique des phénomènes.

Par contre, tout en étant forcé d'être bref, et, peut-être, l'avons-nous été trop, nous nous sommes attaché à décrire les moindres détails de montage et à indiquer les valeurs numériques adoptées pour toutes les quantités intervenant dans chaque expérience.

Nous n'avons pas cru devoir adopter un système de montages uniformes où l'on aurait toujours employé les mêmes accessoires. Nous avons cherché au contraire à les varier le plus possible. — Et ces montages ne nécessitent, le plus souvent, que des objets usuels, afin que les expériences puissent être répétées à la maison, ou, du moins, dans un laboratoire médiocrement outillé.

Nous avons rassemblé certaines recettes particulières et quelques tours de main d'atelier, par ordre alphabétique, en un supplément qui fait suite au Chapitre I^{er}.

Un Appendice, placé à la fin de chaque Volume, contient un certain nombre de constantes physiques et des Tableaux de valeurs numériques pour quelques fonctions usuelles.



LISTE DES COLLABORATEURS.

1. D'ALADERN (Chartres).
2. ANDRAULT (Gap).
3. APPLEYARD (Londres).
4. BADIOU (Bourges).
5. BASSET (Bourges).
6. DE LA BAUME PLUVINEL (Paris).
7. BEHN (Francfort-sur-Mein).
8. BENOIST (Paris).
9. BENOÎT (Sèvres).
10. BERLEMONT (Paris).
11. D. BERTHELOT (Paris).
12. BERTOUX (Lille).
13. BICHAT (Nancy).
14. BIRKELAND (Christiania).
15. V. BJERKNES (Stockholm).
16. BLONDEL (Paris).
17. BONGIOVANNI (Ferrare).
18. BOUASSE (Toulouse).
19. BOUCHER (Saint-Servan).
20. BRILLOUIN (Paris).
21. BRUNHES (Clermont-Ferrand).
22. BUGUET (Rouen).
23. BUISSON (Marseille).
24. CAILLETET (Paris).
25. CAMICHEL (Toulouse).
26. CARVALLO (Paris).
27. CASSIE (Londres).
28. CHABRIER (Nice).
29. CHAIR (Belfort).
30. CHAMPIGNY (Paris).
31. CHASSAGNY (Paris).
32. COLARDEAU (Paris).
33. COLIN (Paris).
34. COLOMB (Paris).
35. COMBET (Tunis).
36. COTTON (Paris).
37. GROVA (Montpellier).
38. CURIE (Paris).
39. DAUVÉ (Beaune).
40. Le R. P. DECHEVRENS (Jersey).
41. DELVALEZ (Paris).
42. DESGRANGES (Savenay).
43. DEVAUX (Brest).
44. DONGIER (Paris).
45. A. DUFOUR (Paris).
46. H. DUFOUR (Lausanne).
47. FABRY (Marseille).
48. FARGE (Roanne).
49. FERNIQUE (Paris).
50. FÉRY (Paris).
51. FISCHER (Munich).
52. FOREL (Morges).
53. FOTSCHIDLOVSKY (Odessa).
54. FOUSSEREAU (Paris).
55. FOVEAU DE COURMELLES (Paris).
56. FRÉCAUT (Asnières).
57. GADOT (Paris).
58. GARIEL (Paris).
59. J. GAY (Paris).
60. GERNEZ (Paris).
61. GHEURY (Manchester).
62. GIBERT (Paris).
63. GIRARDET (Paris).
64. GODEFROY (Paris).
65. GOLDHAMMER (Kazan).
66. GOURÉ DE VILLEMONTÉE (Paris).
67. Le R. P. DE GROOT (Oudenbosch).
68. GUILLAUME (Sèvres).
69. GUTHE (University of Michigan).
70. C.-E. GUYE (Genève).
71. HALLOCH (New-York).
72. HAUDIÉ (Brest).

- | | |
|--|-------------------------------------|
| 73. HENRY (Reims). | 114. OOSTING (Den Helder). |
| 74. HESSEHUS (Saint-Pétersbourg). | 115. OSSENDOWSKY (Wladivostock). |
| 75. HILLAIRET (Paris). | 116. PELLAT (Paris). |
| 76. HOFFMANN (Paris). | 117. PÉROT (Paris). |
| 77. IZARN (Clermont-Ferrand) | 118. PERREAU (Besançon). |
| 78. JANET (Paris). | 119. PERRIN (Paris). |
| 79. JARIAS (Bourg). | 120. PETIT (Foix). |
| 80. JOUBERT (Paris). | 121. PHILIPPE (Bourges). |
| 81. JUPPONT (Toulouse). | 122. H. POINCARÉ (Paris). |
| 82. DE KOWALSKI (Fribourg). | 123. L. POINCARÉ (Paris). |
| 83. LAROUSSE (Nevers). | 124. POTIER (Paris). |
| 84. LAURIOL (Paris). | 125. RAVEAU (Paris). |
| 85. LE BON (Paris). | 126. REMY (Rennes). |
| 86. LEDUC (Nantes). | 127. REVOY (Limoges). |
| 87. JULES LEMOINE (Paris). | 128. ROGER (Épernay). |
| 88. G. LEMOINE (Paris). | 129. ROLLAND (Poitiers). |
| 89. LENOIR (Brest). | 130. DE ROMILLY (Paris). |
| 90. LERMANTOFF (St-Pétersbourg). | 131. SACERDOTE (Paris). |
| 91. LÉRY (Paris). | 132. SAGNAC (Lille). |
| 92. LESPIEAU (Paris). | 133. SANDOZ (Paris). |
| 93. LIMB (Lyon). | 134. SCHURR (Montluçon). |
| 94. LOOSER (Essen). | 135. SCHWEDOFF (Odessa). |
| 95. LUGOL (Clermont-Ferrand). | 136. SELLA (Rome). |
| 96. MACÉ DE LÉPINAY (Marseille). | 137. SERRES (Paris). |
| 97. MALTÉZOS (Athènes). | 138. SIRE (Besançon). |
| 98. MARAGE (Paris). | 139. STARLING (Londres). |
| 99. MAREY (Paris). | 140. STEWART (Newport). |
| 100. MASCART (Paris). | 141. STROUHAL (Prague). |
| 101. MASSOULIER (Nantes). | 142. SWYNGEDAUF (Lille). |
| 102. MATHIAS (Toulouse). | 143. TERRIER (Laval). |
| 103. MATHIEU (Évreux). | 144. DE THAN (Budapesth). |
| 104. MAZOTTO (Sassari). | 145. TIAN (Marseille). |
| 105. VAN DER MENNSBRUGGHE (Gand). | 146. TURPAIN (Poitiers). |
| 106. MERCANTON (Lausanne). | 147. VAISSIÈRES (Carcassonne). |
| 107. MÉTRAL (Paris). | 148. M ^{lle} VENOT (Lyon). |
| 108. MOREAU (Rennes). | 149. MM. VILLARD (Paris). |
| 109. MORIN (Montluçon). | 150. VINCENT (Paris). |
| 110. M ^{lle} MOURGUES (Paris) | 151. VIOLLE (Paris). |
| 111. MM. MULIN (Chambéry). | 152. VUILLET (Grenoble). |
| 112. MUNIER (Chaumont). | 153. WEINBERG (Odessa). |
| 113. VON OËTTINGER (Leipzig). | 154. P. WEISS (Zurich). |

INDEX BIBLIOGRAPHIQUE.

153. Agenda du chimiste.
156. ALDOUS, An elementary course of physics.
157. AMES et BLISS, A manual of experiments in physics.
158. Annuaire de Photographie (1903).
159. ARMAGNAT, Instruments et méthodes de mesures électriques.
160. BARNES, Practical acoustics.
161. BOUANT, Cours de Physique.
162. BOUSSE, Mécanique et Physique.
163. BOYS, Bulles de savon (Trad. Guillaume).
164. BUIGNET, Manipulations de Physique.
165. BURGESS, Experimental physics.
166. CASTLE, Elementary practical physics.
167. CHASSAGNY, Cours élémentaire de Physique.
168. CREW et TATNALL, Laboratory manual of physics.
169. DAMIEN et PAILLOT, Manipulations de physique.
170. EARL, Practical lessons in physical measurement.
171. FARADAY, Manipulations chimiques (Trad. Maiseau et Bussy).
172. GAGE, Physical experiments ; a manual and notebook.
173. GREGORY, Exercise book of elementary practical physics.
174. GREGORY et SIMMONS, Exercises in practical physics.
175. HADLEY, Practical exercises in magnetism and electricity.
176. HALL, Descriptive list of elementary exercises for admission to Harvard College.
177. HOSPITALIER, Recettes de l'électricien.
178. HOSPITALIER, Formulaire de l'électricien.
179. HUGUENIN, Aide-mémoire de l'ingénieur.
180. JAMIN et BOUTY, Cours de Physique.
181. JOUBERT, Traité élémentaire d'Électricité.
182. Journal de Physique.
183. Journal de Physique élémentaire.
184. LORD KELVIN, Conférences scientifiques et allocutions (Trad. Lugol).
185. KOHLRAUSCH, Guide de Physique pratique (Trad. Thoulet et Lagarde).
186. KÖENIG, Quelques expériences d'Acoustique.
187. LANDOLT et BEINSTEIN, Physikalisch-chemische Tabellen.
188. LEBLANC, Les sciences physiques à l'école primaire.
189. LUMIÈRE, La Photographie; deux brochures, Bibliothèque scientifique des écoles et des familles.
190. MAXWELL, La chaleur (Trad. Mouret).
191. MAYER, Sound.
192. MAYER et BARNARD, Light.
193. MERGIER, Manipulations de Physique.

194. NICHOLS, Laboratory manual of physics and applied electricity.
195. NICHOLS, SMITH et TURTON, Manual of experimental physics.
196. PETITOT, Le laboratoire scolaire.
197. PICKERING, Physical manipulation.
198. RAOULT, Tonométrie (Coll. Scientia).
199. RAOULT, Cryoscopie (Coll. Scientia).
200. ROBSON, Practical exercises in heat.
201. SCHUSTER et LEES, Intermediate course of practical physics.
202. SCHUSTER et LEES, Advanced exercises in practical physics.
203. STEWART et GEE, Elementary practical physics.
204. Syllabus of the course of practical instruction in physics at the Royal College of Science South Kensington.
205. TERQUEM et DAMIEN, La Physique expérimentale.
206. S.-P. THOMPSON, Light visible and invisible.
207. THRELFALL, On laboratory arts.
208. TYNDALL, La chaleur (Trad. Abbé Moigno).
209. VIDAL, Traité pratique de Photochromie.
210. VIOLLE, Cours de Physique.
211. WALLON, Choix et usage des objectifs photographiques.
212. WEINHOLD, Experimental physics.
213. WENTWORTH et HILL, Laboratory exercises in elementary physics.
214. WEIDEMANN et EBERT, Physikalisches Praktikum.
215. WILBERFORCE et FITZPATRICK, A laboratory note-book of elementary practical physics.
216. WITZ, Manipulations de Physique.
217. WOOLCOMBE, Practical work in physics.
218. WORTHINGTON, Physical laboratory practice.



RECUEIL D'EXPÉRIENCES

ÉLÉMENTAIRES DE PHYSIQUE.

CHAPITRE I.

TRAVAUX D'ATELIER (').

TRAVAIL DES MÉTAUX A L'ÉTAU.

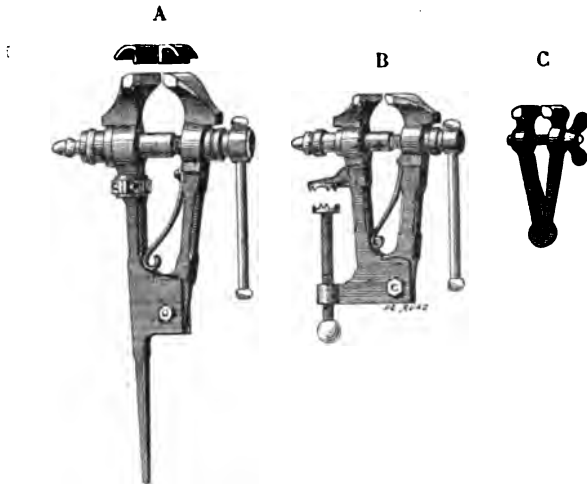
1. Étaux. — L'*étau à pied* A doit être installé contre un établi solide, en chêne ou en hêtre, près d'une fenêtre. Les *mordaches*, en plomb, servent à recouvrir les mâchoires et à protéger les pièces délicates.

L'*étau à agrafes* B, moins robuste, se fixe sur le bord d'une table quelconque.

L'*étau à main* C sert de pince.

(') Ce Chapitre a été rédigé par M. JULES LEMOINE, professeur au lycée Louis-le-Grand.

2. Travail à la lime. — Suivant le travail, on emploie les limes *plates* A, *demi-rondes* B, *rondes* C, *triangulaires* D.



Pour chacune de ces formes, on doit posséder une *série* de limes à



grains de plus en plus fins. On les emploie, suivant les travaux à faire, dans l'ordre suivant :

1° *Lime à gros grains* (longueur utile : $l = 30^{\text{cm}}$), employée pour dégrossir ;

2° *Lime bâtarde* ($l = 20^{\text{cm}}$) ;

3° *Lime demi-douce* ($l = 20^{\text{cm}}$) ;

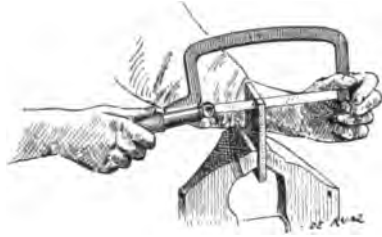
4° *Lime douce* ($l = 20^{\text{cm}}$).

On polit ensuite avec le papier d'émeri.

On s'exercera à dresser à la lime une surface plane un peu large

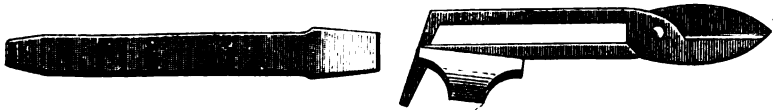
sur une barre de 2^{cm} de diamètre, à obtenir une surface cylindrique, une surface conique, etc... Il faut employer de préférence les vieilles limes pour le fer et l'acier.

3. Couper une lame ou une tige métallique. — 1° *A la scie.* — On doit posséder deux scies à métaux réservées respectivement au laiton et au fer. La lame ($l = 18^{\text{cm}}$), doit être montée de façon que le côté vertical de la dent soit en avant. La pièce à scier est marquée, puis fixée solidement dans l'étau. Le manche étant tenu dans la main droite qui pousse la scie, la main gauche dirige l'avant et appuie.

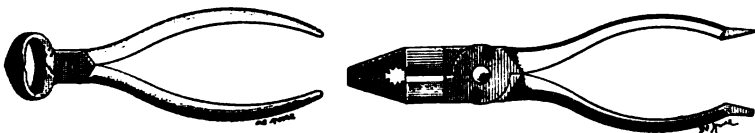


2° *A la lime triangulaire.* — La lime triangulaire ou *tiers-point* permet de creuser, dans l'acier, une gouttière suivant un trait marqué. Lorsque la gouttière est assez profonde, on pose la lame sur le bord de l'*enclume*, et, d'un coup de marteau, on sépare les deux morceaux.

3° *Au burin.* — Le tranchant du burin étant posé sur le trait marqué, on frappe sur la tête avec un marteau lourd (1^{kg}). On coupe ainsi les lames et les barres de fer à froid, l'acier à chaud. On affûte le burin à la meule.



4° *A la cisaille* ($l = 60^{\text{cm}}$). — La cisaille fixée dans l'étau permet de couper des tiges ou des barres jusqu'à une épaisseur de 0^{cm}, 15.

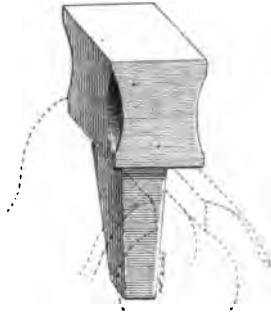


5° *Avec les ciseaux, les pinces coupantes, la pince universelle.* — Des ciseaux forts sont suffisants pour couper le carton, le cuir, l'amiante, le clinquant, etc.

Pour couper des fils (conducteurs pour l'électricité, pointes, etc.),

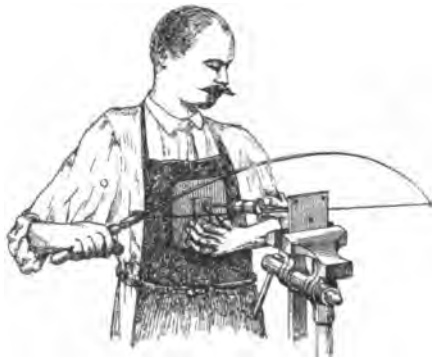
on peut employer de préférence les pinces coupantes ou la pince universelle. — Pour couper un fil d'acier trempé, on doit d'abord recuire le fil dans une flamme de veilleuse.

4. Affûtage de la scie à métaux. — On commence par donner *de la voie* en refoulant les dents. Pour cela, on fait reposer la lame sur le *tas à queue* de façon que le plan de la lame soit ver-



tical et les dents en haut. En battant les dents au marteau, on les aplatit. On termine en affûtant au tiers-point de la même façon que pour les scies à bois (I, 24). — On trouve maintenant dans le commerce des scies qui n'ont jamais besoin d'être affûtées.

5. Percer un trou dans une lame métallique. — On commence par amorcer le trou avec le *pointeau* (diamètres : 0^{cm},5 ; 0^{cm},8 ; 0^{cm},11). En donnant un coup de marteau sur la tête du pointeau, on produit un trou conique.

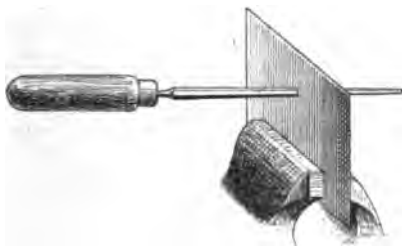


On termine le trou soit sur le tour (I, 16), soit avec l'*archet à percer* dont la corde (fil de fouet de 0^{cm},25) fait un tour sur la

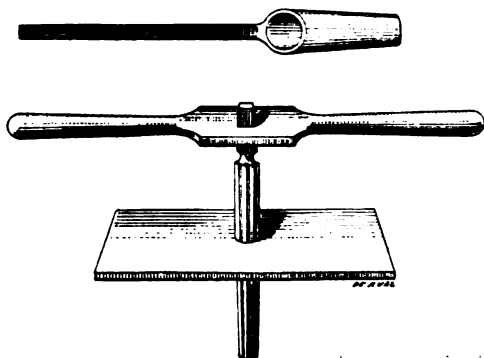
bobine. L'un des bouts de l'axe de la bobine repose dans un trou conique de la *conscience* sur laquelle on pousse avec la poitrine. L'autre extrémité de l'axe est constituée par la *mèche* qui s'appuie sur la plaque à percer fixée verticalement dans l'étau. Le mouvement de rotation est commandé par le mouvement alternatif de l'archet; la mèche ne coupe que pendant l'aller. On remplace parfois l'archet par le *drille* ou le *porte-foret à conscience*.

On peut encore percer des trous dans le cuir, le carton ordinaire, le carton d'amiante, le clinquant, etc. avec un *emporte-pièce*, (série de diamètres croissant, par millimètre, de 4^{mm} à 18^{mm}). La feuille à trouser est posée à plat sur un billot de bois en bout. Un ou deux coups de marteau appliqués sur l'emporte-pièce suffisent pour enlever la rondelle circulaire.

6. Augmenter le diamètre des trous. — On augmente, d'une façon continue, les diamètres des trous avec les *équarris-*



soirs et les *alésoirs*. Les équarrissoirs s'emploient pour les trous de petit diamètre qu'ils rendent légèrement coniques en les agran-



dissant. On les manœuvre au moyen du manche (série de diamètres croissant, par millimètre, de 0^{mm}, 5 à 7^{mm}).

Les alésoirs, cylindres creusés suivant les génératrices de cannelures tranchantes, s'emploient pour les trous de plus grand diamètre qu'ils rendent parfaitement lisses et cylindriques. On les manœuvre avec le *tourne à gauche* (mettre de l'huile), (série de diamètres croissant, par millimètre, de 5^{mm} à 20^{mm}).

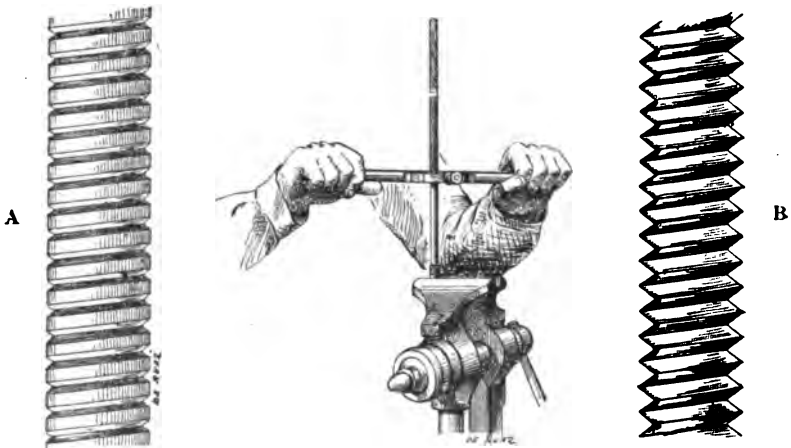
7. Tarauder un trou. — Le trou doit être percé par une



mèche de rayon égal à celui du *taraud* diminué de la profondeur du filet (série de tarauds de diamètres croissant, par millimètre, de 1^{mm} à 6^{mm}, puis croissant par 2^{mm} jusqu'à 14^{mm} avec les mèches et coussinets de filières correspondants). Le taraud, tenu dans l'étau à main ou dans le tourne à gauche, est introduit, en vissant, dans le trou (mettre de l'huile). Le filet se creuse et est terminé quand on a utilisé entièrement l'outil. La vis ou la tige filetée qui lui correspond doit entrer juste. L'atelier doit posséder les vis à métaux (fer et laiton) qui correspondent à chaque taraud jusqu'au diamètre de 6^{mm}. A chaque série (mèche,

taraud, vis) correspond en outre une seconde mèche pour le passage libre de la vis.

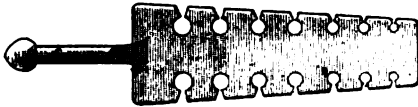
8. Filetage d'une tige. — La *filière à coussinets* comprend un tourne à gauche dans l'échancrure duquel peuvent se placer



deux blocs d'acier creusés chacun d'une gouttière (écrou coupé en deux) portant en creux le filet. La tige est placée verticalement dans l'étau. Son extrémité supérieure est pincée entre les deux

coussinets. En faisant tourner la filière autour de la tige, les filets se creusent peu à peu (A et B) (mettre de l'huile). Après chaque passe, on rapproche les coussinets au moyen d'une vis de pression latérale, jusqu'à ce que le filet soit terminé et rentre dans l'écrou que l'on a eu soin de tarauder d'abord.

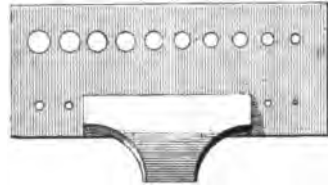
La *filière à truëlle*, lame d'acier portant une série de trous



filetés, s'emploie comme la filière à coussinets, mais sans réglage, pour les tiges de petit diamètre.

9. Étirer un fil. — La *filière à étirer* (diamètres extrêmes, 0^{mm}, 2 et 2^{mm}, 5) est fixée dans l'étau.

Après avoir aminci le fil à étirer à une extrémité, on le passe dans les trous de plus en plus petits en entrant la pointe du fil par la base évasée des trous. On saisit l'extrémité du fil sur laquelle on tire avec une



pince plate. Recuire de temps en temps le fil et le frotter avec de la cire pour éviter qu'il ne grippe.

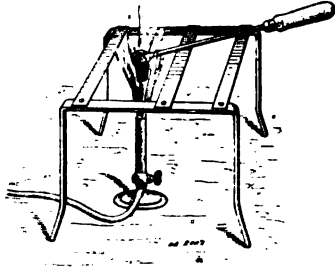
10. Réunir deux lames métalliques par un rivet. — On perce un trou qui traverse les deux lames et dans lequel on engage



le rivet (rivets de 1^{mm}, 2^{mm}, 3^{mm}, 4^{mm} en fer ou cuivre rouge); il se trouve arrêté par sa tête. L'autre extrémité est écrasée avec le marteau à river dont on utilise d'abord le biseau, puis la base. On refoule le métal pour constituer une seconde tête au rivet.

On écrase aussi la tête des rivets avec la *bouterolle*.

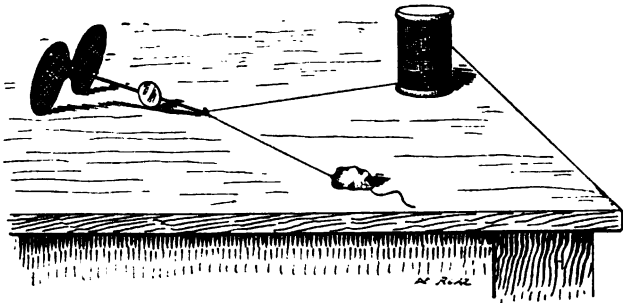
11. Soudure à l'étain. — Les pièces à souder, parfaitement ajustées et nettoyées, sont humectées avec une dissolution de *chlorure de zinc*. Le fer à souder, de poids convenable pour la soudure à faire (1^{kg} au maximum) est chauffé fortement, sans atteindre le rouge, sur un fort *bec Bunsen* ($h = 18^{\text{cm}}$; $d = 1^{\text{cm}}, 6$). On frotte sur un morceau de *chlorure d'ammonium* le biseau du fer pour le décaper. Si le fer est suffisamment chaud, il donne d'épaisses fumées blanches. Mis au contact de la soudure (poids égaux d'étain et de plomb), il en emporte une goutte.



En le passant ensuite sur les bords de la coupure, l'étain s'attache au métal et soude les deux morceaux. On laisse refroidir la pièce avant de la déplacer.

Dans certains cas, on chauffe les pièces à souder au chalumeau ordinaire (air et gaz d'éclairage). La soudure, posée en grains sur le métal décapé et mouillé au chlorure de zinc, coule lorsque la température devient suffisante.

Pour souder un fil de galvanomètre ou d'électromètre (fil d'argent de quelques centièmes de millimètre), on fait passer le fil dans le



crochet de la suspension qu'il doit porter et l'on fixe son extrémité sur la table avec un peu de cire molle. Sur le crochet et le fil en contact, on fait couler avec le fer chaud quelques grains de résine (le chlorure de zinc ne peut être employé comme décappant parce qu'il couperait le fil dans la suite). Ensuite on étame le fer (très petit fer) et on le frotte, chaud, sur l'endroit à souder.

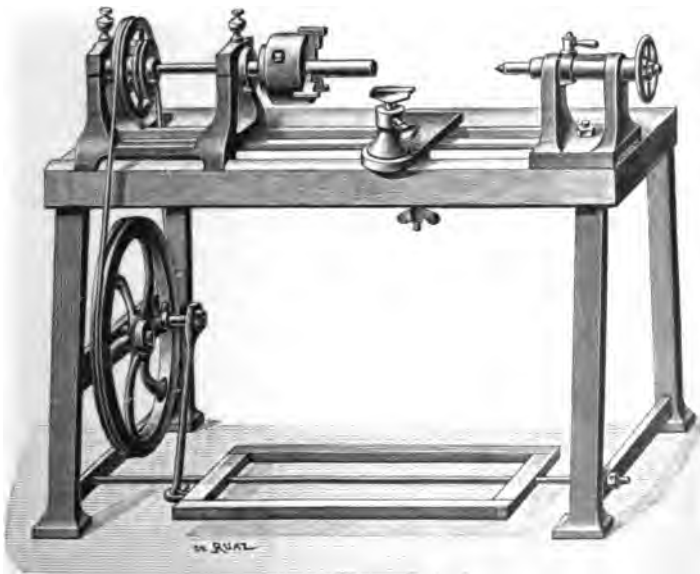
12. Brasure au cuivre et à l'argent. — La brasure dite *au cuivre* comprend parties égales de cuivre et de zinc; la brasure à l'*argent* est formée de deux parties d'argent pour une de laiton.

Les pièces à souder, *très propres*, sont ajustées l'une sur l'autre dans la position qu'elles doivent garder : on peut les attacher avec du fil de fer. Du borax en poudre, mouillé, et un volume égal de soudure en petits grains, recouvrent la fente. On entoure la pièce de quelques charbons de bois allumés. D'autre part, on dirige sur la soudure la flamme du chalumeau. Le borax fond d'abord, la soudure ensuite. Quand on voit la soudure couler, on laisse refroidir.

Quand on brase le cuivre ou le laiton, il faut éviter d'atteindre la température de fusion du métal.

TRAVAIL DES MÉTAUX AU TOUR.

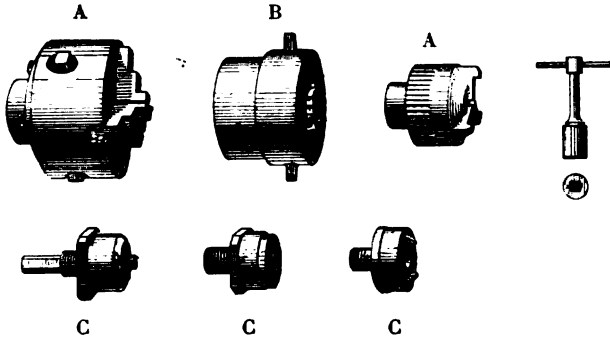
13. Tour. — Le tour, qui servira à la fois pour le travail du bois et des métaux, est un tour à *pédale* de 120^{cm} de longueur. L'axe



porte deux poulies. La grande sera utilisée pour les métaux, la petite pour le bois.

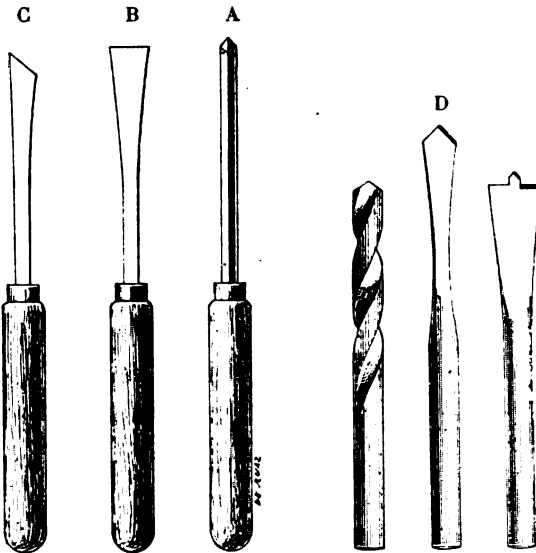
Sur le nez de l'arbre qui porte un filet extérieur et un filet intérieur peuvent se visser les *mandrins*.

Le *mandrin américain* A possède trois *mors* réglables simultanément par des vis latérales; ils permettent de pincer la pièce. Si cette pièce est de gros diamètre, elle est arrêtée par la face du man-



drin. Si elle est de plus petit diamètre, elle peut entrer dans le trou percé au centre du mandrin.

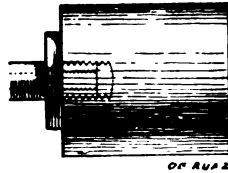
Le *mandrin à coussinets* B serre la pièce entre deux coussinets à réglages indépendants.



Les *mandrins en laiton* C se vissent, à bloc, dans le nez du tour. On les termine, à droite, par une tige filetée sur laquelle on peut

visser la pièce à travailler, ou par une section plane, normale à l'axe, sur laquelle on peut souder une plaque (I, 11). Si la surface latérale est cylindrique et de diamètre convenable on peut l'entrer à force dans un tube de métal qui se trouve ainsi centré (I, 19). Enfin le mandrin peut porter sur sa section deux griffes qui permettent de tenir un billot de bois (I, 32).

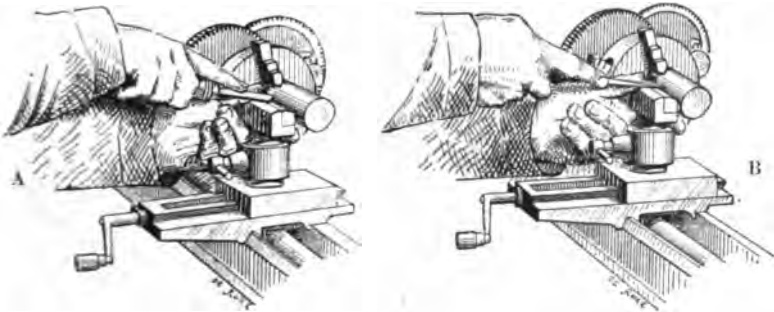
Un *mandrin en bois* formé d'un bloc cylindrique en bois peut se visser extérieurement sur le nez. Il sert, comme le mandrin en laiton, à porter un tube métallique, une lame métallique, ou même une planche en bois.



Les outils spéciaux indispensables pour le travail du tour sont : le *burin de tour* A, la *plane au cuivre* B, l'*outil à couper* C, la *molette*, les *mèches* D, etc.

Le *tour des horlogers*, beaucoup plus petit, peut aussi être utilisé dans les laboratoires pour le travail des petites pièces.

14. Tourner un cylindre de laiton. — Fixer une extrémité d'une tige de laiton dans le mandrin américain, et constater, en tournant, qu'elle est sensiblement centrée. Fixer le porte-outil



parallèlement aux génératrices aussi près que possible de la pièce à tourner et à peine en dessous de l'axe. La main droite tient le manche, la main gauche maintient solidement sur le porte-outil l'extrémité du burin pour l'empêcher de suivre les mouvements de la surface de la tige. Cette extrémité présente deux pointements identiques ; l'un de ces pointements repose sur le porte-outil et l'on enlève des copeaux de métal avec la pointe la plus aiguë du burin (A).

La pièce est dégrossie quand l'ancienne surface a été enlevée et que le corps est parfaitement de révolution autour de l'axe. On cherche alors à rendre cylindrique cette surface de révolution

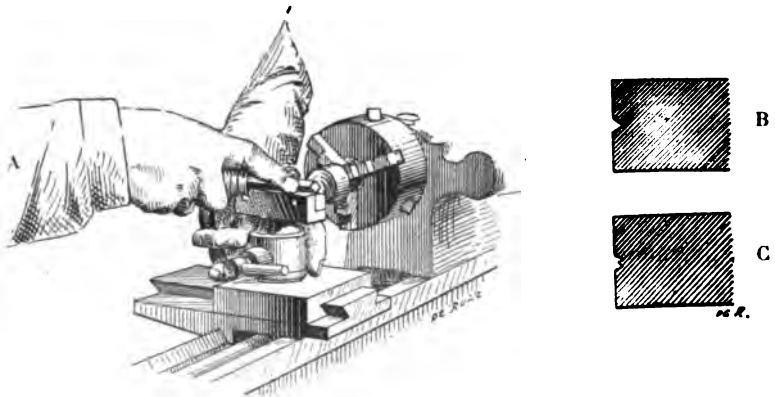
en se servant des arêtes coupantes du burin. Enfin on termine en remplaçant le burin par la plane dont le tranchant doit être tenu parallèlement aux génératrices, à la hauteur de l'axe ou un peu en dessous (B).

15. Dresser le bout d'un cylindre. — Placer le porte-outil parallèlement à l'axe du tour, près de l'extrémité du cylindre.



Dégrossir au burin, puis rendre plane la base en évitant de laisser un téton en saillie au centre. Terminer à la plane.

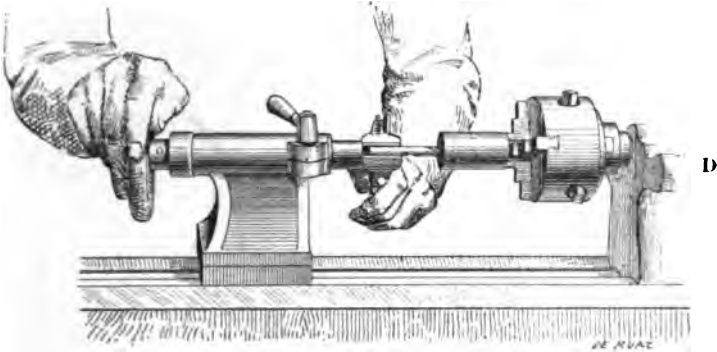
16. Percer un trou suivant l'axe. — On commence par



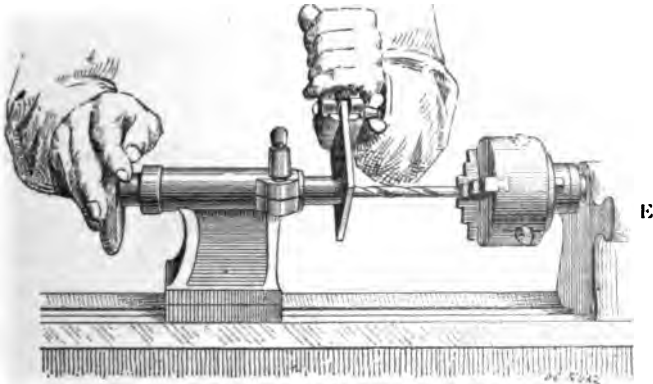
marquer le centre avec la pointe du burin que l'on pousse fortement pour la faire pénétrer dans le métal (A). Elle produit un trou conique (B). Au fond du trou resterait un cône saillant si la pointe du burin n'avait pas été maintenue sur l'axe de rotation (C).

On perce alors le trou à la mèche (mèche américaine ou foret).

Celle-ci, tenue dans l'étau à main, appuyée par son extrémité coupante sur le centre, tandis que la poupée droite repousse la seconde extrémité par l'intermédiaire de l'étau. En tournant la manivelle de la poupée pendant que le tour est en rotation, on fait pénétrer la mèche dans le métal sans qu'elle prenne d'autre mouvement. Le trou est ainsi centré (D).



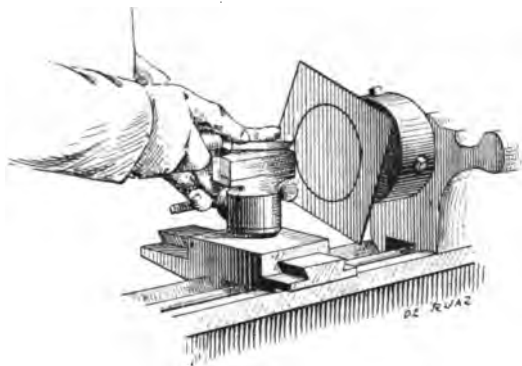
On perce de même une plaque de métal en appuyant sur la mèche, fixée dans le mandrin américain en rotation, la plaque, tenue dans l'étau à main et reposant sur la poupée droite qui l'appuie fortement sur la mèche (E).



On peut enfin tarauder la pièce sur le tour. Pendant la rotation on introduit dans le trou le taraud fixé dans l'étau à main. Le taraud entre en se vissant et en creusant le filet. Quand on arrive près du fond, on arrête le tour, ou mieux on le tourne en sens contraire pour dégager le taraud.

17. Découper une plaque circulaire. — On soude la plaque sur la face du mandrin en laiton qui a été d'abord dressée normalement à l'axe.

Puis on marque avec la pointe du burin, sur la plaque en rotation, le cercle à découper. On en vérifie le diamètre. Enfin on

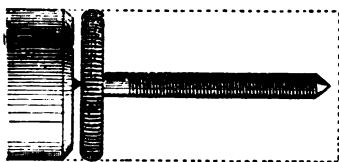


creuse avec l'outil à couper une entaille circulaire jusqu'au moment où la partie extérieure se détache. On dresse alors le bord de la plaque avec le burin ou la plane.

C'est de la même façon que l'on détache un anneau de diamètre donné.

18. Fabrication d'une vis calante en laiton. — On fixe sur le tour une tige cylindrique dont le diamètre dépasse un peu celui de la tête de la vis.

On commence par faire la tige de la vis. Pour cela on dégrossit



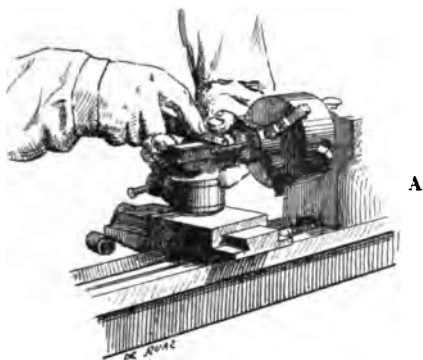
l'extrémité au burin ou à la *gouge à dégrossir*, pour produire, sur une longueur suffisante, un cylindre de diamètre convenable. On serre sur ce cylindre la filière à coussinets et, en faisant marcher le tour, on creuse

le filet. On termine la pointe au burin.

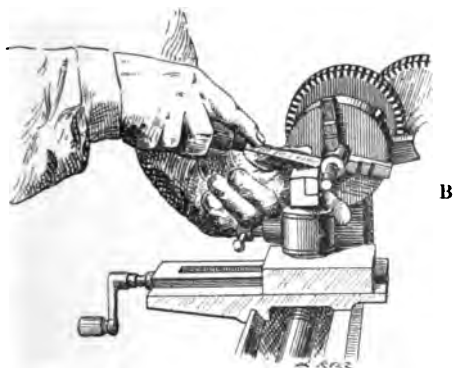
La face droite de la tête de la vis étant convenablement dressée, on marque d'une entaille profonde la limite de la vis vers la gauche. On tourne la surface latérale de la tête de la vis, puis on la molette. Pour cela on appuie fortement la molette sur la surface à moleter et l'on tourne à grande vitesse (A).

On détache enfin la vis avec l'outil à couper. Celui-ci est tenu

perpendiculairement à l'axe, le sommet de l'angle obtus reposant sur le porte-outil. En faisant basculer l'outil autour de son point d'appui de façon que le tranchant aille de bas en haut, on commence à creuser le métal. On avance ensuite un peu l'outil



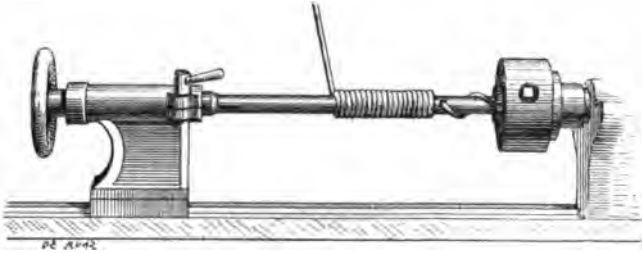
sur le support et l'on recommence le même mouvement. On atteint ainsi l'axe et la vis se détache (B).



19. Couper un tube. — On fixe le tube sur le mandrin en laiton ou en bois (I, 13). Le mandrin américain est même suffisant pour les tubes de petit diamètre. On centre le tube par quelques coups de marteau, et on le coupe au burin ou à l'outil à couper à l'endroit voulu.

20. Enrouler un fil en boudin. — Une barre cylindrique de métal, ayant un diamètre un peu inférieur au diamètre intérieur du boudin, est serrée dans le mandrin américain et maintenue par la poupée droite.

L'extrémité du fil à enrouler est pincée dans le mandrin. On fait à la main deux ou trois tours pour commencer l'enroulement. Puis on lance le tour en guidant le fil de façon que les spires se touchent. En même temps un aide placé à quelques mètres de distance tire fortement sur le fil qui va s'enrouler. Les spires ainsi obtenues ne

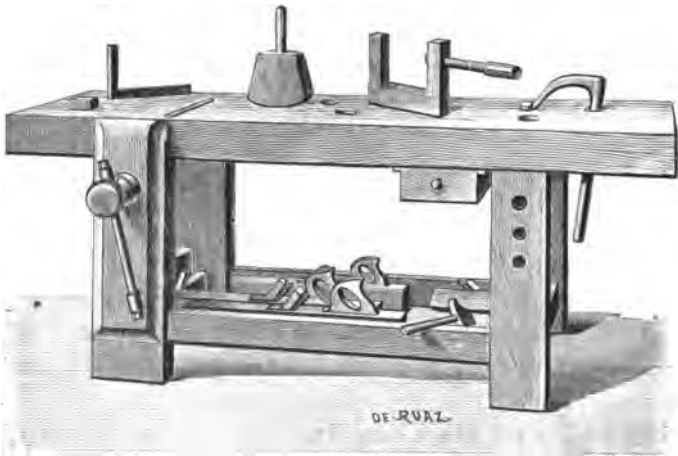


se déroulent pas et sont très régulières sur toute la longueur.

Ces boudins peuvent être utilisés pour la construction des résistances électriques (maillechort) et des ressorts (acier).

TRAVAIL DU BOIS A L'ÉTABLI.

21. Établi. — On peut choisir un établi en orme ou en hêtre



ayant les dimensions suivantes : longueur = 200^{cm} ; largeur = 50^{cm} ; épaisseur = 10^{cm} ; hauteur des pieds = 80^{cm}.

22. Scier une planche perpendiculairement aux fibres.

— Marquer au *crayon de menuisier* le trait que doit suivre la scie. Fixer la planche, à plat sur l'établi, sous le *valet* que l'on enfonce d'un coup de maillet. La scie (*scie à débiter* et *scie à tenons*) est manœuvrée de la main droite. La main gauche la maintient sur le trait. En poussant, sans appuyer, on amorce le trait



avec la partie de la scie éloignée de la main. On continue, en



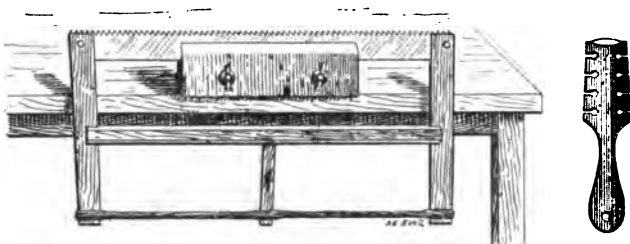
suivant le trait, et en donnant au bras un mouvement d'une amplitude presque égale à la longueur de la lame. La scie doit être

tenue par l'extrémité convenable pour que les dents ne mordent que lorsque l'on pousse.

23. Scier une planche suivant les fibres. — On emploie la *scie allemande* ou *scie à refendre*. La planche est fixée à plat sur l'établi, de façon que le trait marqué soit parallèle au grand côté. La lame de la scie est orientée obliquement sur le plan de son cadre pour que le morceau à détacher puisse passer entre la lame et le montant qui lui est parallèle. On scie en descendant, le plan de la lame étant vertical, le haut de la scie penché en avant. La main droite est motrice; le rôle de la main gauche doit se borner à soutenir la scie et à la diriger. C'est la condition, difficile à réaliser au début, pour suivre le trait.

On opère de la même façon pour découper une planche suivant une courbe tracée sur le plat, seulement on emploie la scie à chan-tourner, dont la lame est moins large (1^{cm} à 2^{cm}).

24. Affûtage des scies. — La lame est pincée verticalement entre les planches de la *mâchoire à ressort*. Le tout est maintenu par le valet qui immobilise sur l'établi une planchette fixée aux mâchoires.



Avec un *tiers-point*, tenu *perpendiculairement* au plan de la lame, on *rafratchit* chacun des creux de façon que les pointes deviennent vives. Sur une longueur de 20^{cm} environ, les dents de l'extrémité éloignée de la main, et qui servent à amorcer le trait, ont leurs côtés également inclinés sur le bord non denté de la lame. Les autres dents ont un côté perpendiculaire au bord de la lame. C'est le côté opposé à la main.

On donne alors de la *voie* à la lame avec le *tourne à gauche*. Pour cela, plaçant l'œil dans le plan de la lame, on prend une dent dans l'une des fentes du tourne à gauche, et on la tord pour l'écartier du plan de la lame. Toutes les dents de même parité sont écartées d'un même côté, alternativement droit et gauche pour les dents

successives. La voie de la scie ne doit pas dépasser le double de l'épaisseur d'une dent.

25. Raboter une planche. — La planche est posée à plat sur l'établi, l'une de ses extrémités étant arrêtée par les griffes si l'on veut raboter les faces. Elle est fixée dans l'étau, son plan étant vertical, si l'on veut raboter les côtés.

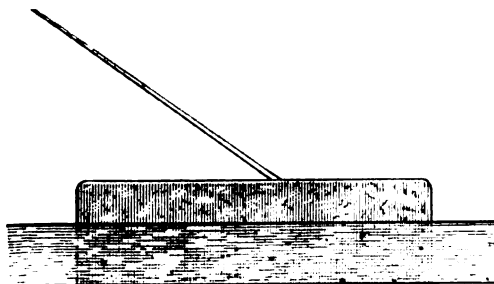
Le *riflard* sert à *blanchir* la planche, c'est-à-dire enlever la surface généralement sale et râpeuse. On évite de prendre le bois à rebours en veillant à ce que l'extrémité des fibres qui émerge à la surface de la planche soit dirigée du côté des griffes. On rend ainsi la surface à peu près plane.

La *varlope* termine le travail en enlevant une épaisseur moindre de bois sur une surface plus large et en *dressant* la surface.

On dresse ensuite les côtés de la planche fixée dans la presse, en employant successivement encore le riflard et la varlope. On vérifie à l'équerre que les côtés sont perpendiculaires aux faces du plat.

Le *rabot* est employé à la place de la varlope pour les surfaces de peu d'étendue.

26. Réglage et affûtage des rabots. — On affûte le fer en l'usant sur un grès plan mouillé, et posé dans une caisse dont le fond doit toujours contenir de l'eau. On lui donne un mouvement

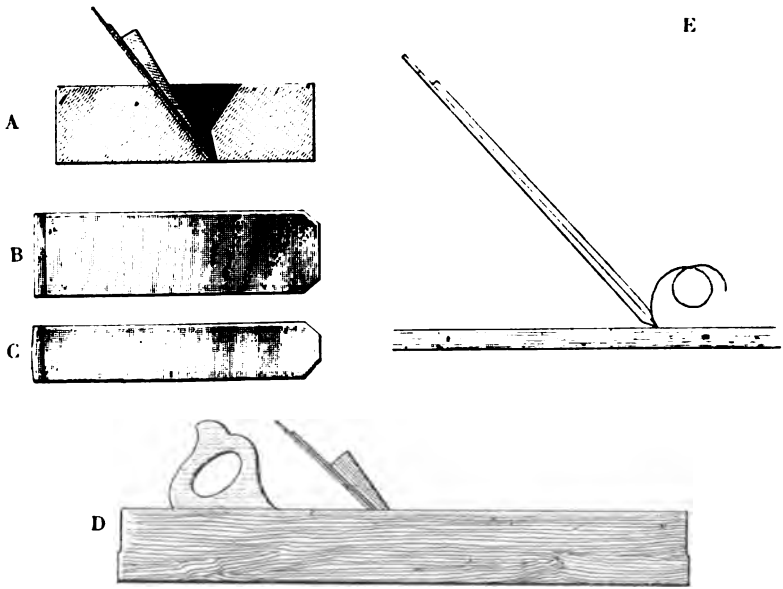


rectiligne en s'appliquant à ne pas faire varier l'angle du fer avec la surface du grès.

On fait disparaître le *morfil* qui reste sur l'arête avec la *pierre à huile*. On frotte en tournant. Le fer est tenu successivement d'abord dans la position précédente, puis en appliquant à *plat*, sur la pierre, la seconde face qui aboutit au biseau.

Pour l'installer dans le rabot, on applique sur lui le *contre-fer* dont la distance au biseau (1^{mm}, 2^{mm}, 3^{mm}) doit être d'autant plus

faible qu'on veut que les copeaux soient plus courts. L'ensemble du fer et du contre-fer est placé dans la *lumière* et immobilisé par



LÉGENDE. — A, rabot; B, fer de varlope; C, fer de riflard; D, varlope ou riflard; E, effet du contre-fer.

le *coin* en bois. Les copeaux sont d'autant plus minces que le fer dépasse moins le plan inférieur du rabot (plus de 1^{mm} pour le riflard, moins de 1^{mm} pour la varlope et le rabot).

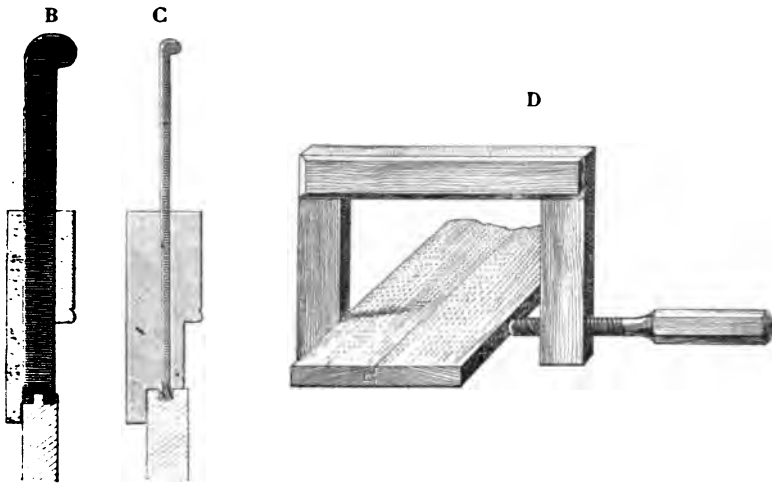
Les *ciseaux*, *bédanes*, *gouges* peuvent s'affûter de la même manière.

27. Assembler et coller deux planches. — Les deux

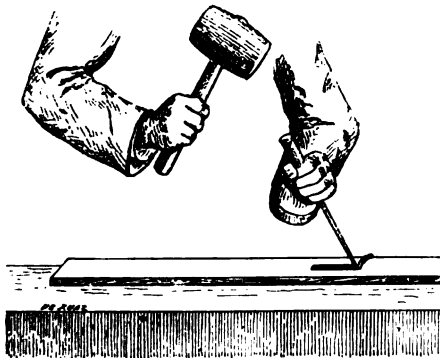
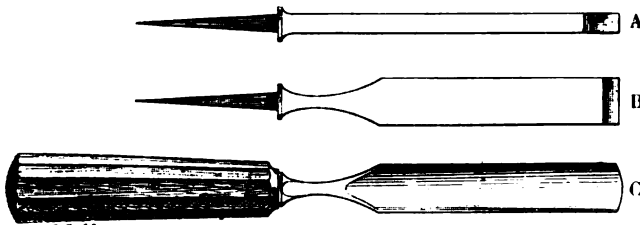


planches sont soigneusement dressées et amenées à la même épaisseur. On fixe la première dans la presse, le côté à travailler hori-

zontal et en dessus, et l'on y creuse une rainure avec le *bouvet à rainure* (A, C). Dans la seconde on fait sortir la languette de même



épaisseur que la rainure avec le *bouvet à languette* (A, B). Un rabot spécial, le *guillaume*, permet d'enlever, à côté de la lan-



guette utile, une languette latérale superflue laissée par le bouvet. On chauffe la *colle forte*, au bain-marie, dans un pot spécial. On

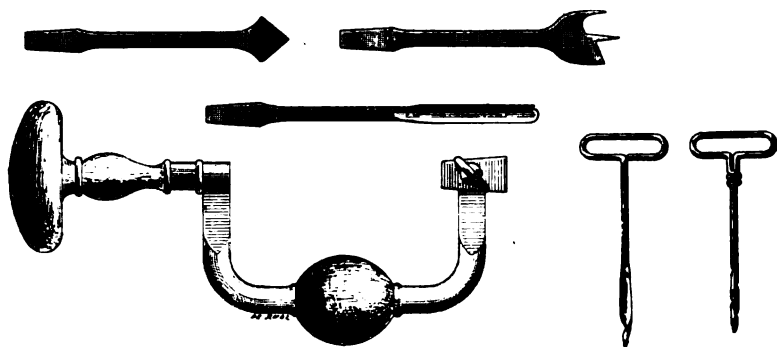
badigeonne rapidement au pinceau les deux surfaces à coller. On fait rentrer la languette dans la rainure par quelques coups de maillet, et l'on maintient les deux planches en contact jusqu'au moment où la colle est prise en les pressant entre deux ou trois *serre-joints* (D).

28. Creuser une planche. — On emploie trois outils : le *ciseau* (B), le *bédane* (A), la *gouge* (C).

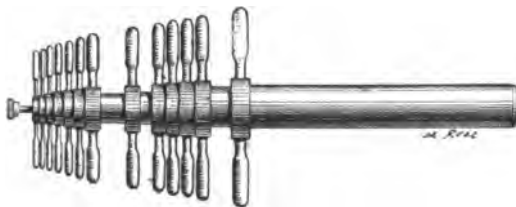
On creuse en maniant directement l'outil à la main ou bien en s'aidant du maillet.

29. Percer des trous cylindriques dans le bois. — On peut employer la *vrille*, le *vilbrequin* ou le *tour* (I, 16).

On augmente le diamètre du trou ou on lui donne une forme différente avec les *râpes à bois cylindriques et demi-rondes*. On

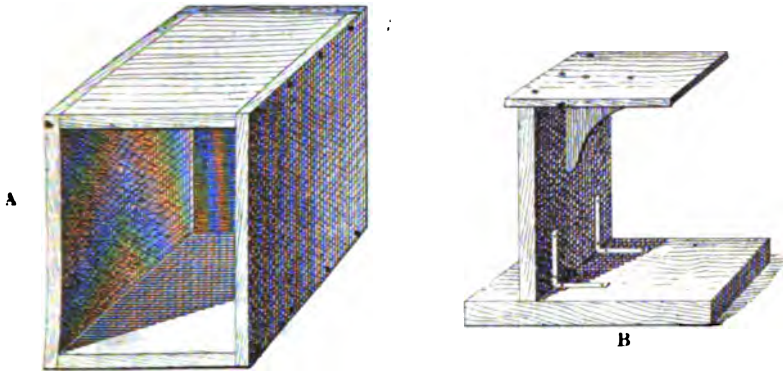


évide l'orifice du trou avec les *fraises* que l'on manœuvre comme les mèches avec le vilbrequin. Cet évasement peut servir à loger la tête d'une vis qui ne doit pas dépasser la surface du bois.



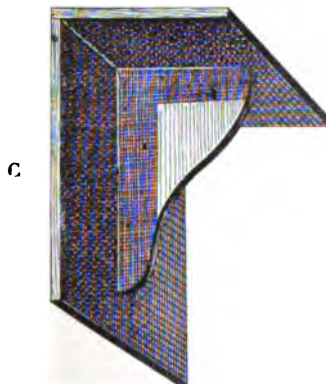
Pour percer les bouchons de liège, le meilleur procédé consiste à employer les *queues de rat*. On peut aussi employer l'emporte-pièce spécial que représente la figure ci-dessus.

30. Fabrication d'un support caisse, d'une potence, d'une console, etc. — Les planches sont successivement rabotées, tracées au crayon, découpées à la scie et vérifiées à l'équerre, puis clouées ou vissées. Dans ce dernier cas, il est commode de les



clouer provisoirement avant de percer à la vrille les deux trous d'un seul coup dans les deux planches que la vis doit réunir. Terminer, au besoin, avec la râpe.

En outre d'un jeu de supports-caisses (A), il est utile d'avoir des petits bancs et des planches plus ou moins épaisse. La combi-



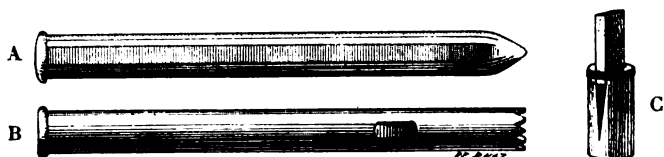
raison de ces différents supports permet de réaliser toutes les hauteurs.

On construit facilement une potence (B) avec deux planches que

l'on fixe rectangulairement l'une sur l'autre. On doit la consolider avec une équerre en fer ou en bois qui permet aussi d'amener les deux planches à être d'équerre.

On saura construire de même une console (C) assez solide pour supporter un galvanomètre.

31. Scellement dans un mur. — On perce des trous perpendiculaires au mur avec le tamponnoir (cylindrique de préférence) que l'on enfonce à coups de marteau. Après chaque coup on lui donne un léger mouvement de rotation autour de son axe. Le trou doit avoir une profondeur variable avec la solidité désirée (4^{cm} à 5^{cm}, par exemple). Une cheville en chêne, aussi grosse que possible, est entrée dans le trou à coups de marteau, puis coupée



A, tamponnoir ordinaire; B, tamponnoir cylindrique; C, cheville.

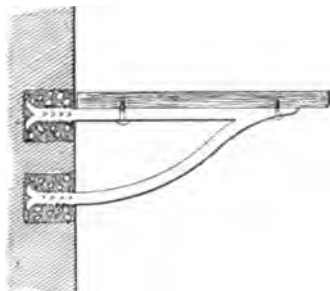
au ras du mur. Aux tamponnoirs cylindriques correspondent des chevilles préparées, qui entrent juste dans le trou et que l'on fait



éclater ensuite en faisant entrer jusqu'au fond une petite planchette qui pénètre dans une entaille du cylindre. Le tampon prend alors la forme d'un cône tronqué dont la petite base est à la surface du mur.

On peut fixer dans ces tampons des objets divers au moyen de vis.

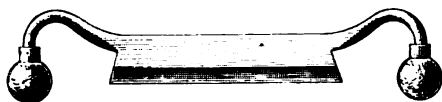
On peut, dans des trous plus grands faits dans le mur avec le burin, fixer, par exemple, une barre métallique. Le trou terminé est mouillé à l'éponge, puis garni de plâtre gâché. On y introduit la barre métallique mouillée. On achève de remplir de plâtre et l'on termine en bourrant dans le plâtre des morceaux mouillés de brique ou de pierre. La planchette est fixée sur la barre au moyen de vis.



TRAVAIL DU BOIS AU TOUR.

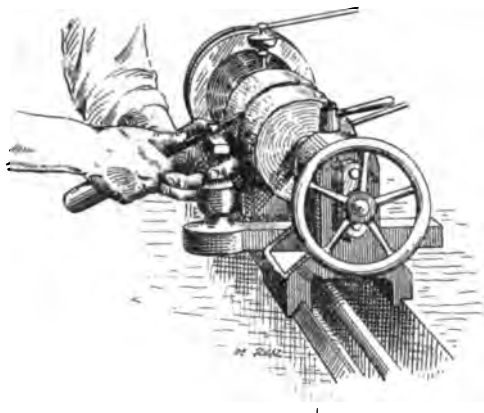
32. Le tour employé est le même que pour les métaux, seulement la courroie passe sur une poulie de plus petit diamètre qui permet d'atteindre une plus grande vitesse. Les bois tendres ou fibreux se travaillent difficilement. On peut employer principalement les essences suivantes : buis, poirier, charme, acacia, alisier, etc. Les outils principaux sont la gouge, le ciseau à deux biseaux, la plane de charron, le taraud qui correspond au filet extérieur du nez de l'arbre du tour, le mandrin à griffe (I, 13).

33. Tourner un cylindre. — Avec une scie fine, on fait dans un arbre deux sections perpendiculaires à la longueur et l'on marque à peu près les centres. Avec le compas on trace les cercles de base, puis on travaille la surface latérale avec la plane de charron pour la dégrossir et l'approcher de la forme voulue.



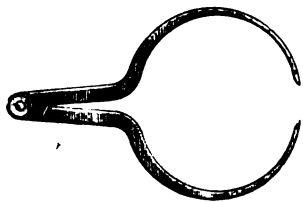
On l'installe sur le tour entre le mandrin à griffe et la contre-pointe. D'un coup de marteau on entre les griffes dans l'une des bases et l'on approche la contre-pointe qui vient s'appuyer légèrement dans un trou conique au centre de la base opposée. On vérifie que la pièce tourne à peu près rond.

On approche latéralement le support et la cale est réglée au-dessus et très près du plan horizontal de l'axe. On prend la gouge



en tenant dans la main droite le manche, un peu baissé; le fer, posé sur la cale, est maintenu solidement dans la main gauche. La gouttière de la gouge est en de-sus, le biseau presque tangent à la surface du cylindre. On creuse une gouttière jusqu'à ce qu'elle fasse le tour, puis, déplaçant latéralement l'outil, on creuse d'autres gouttières à côté jusqu'au moment où l'on a ainsi travaillé toute la surface. Alors le cylindre tourne *parfaitement rond*.

On termine l'ébauche en déplaçant la gouge parallèlement à l'axe, pour faire disparaître les ondulations suivant les génératrices. On vérifie au compas l'uniformité du diamètre.



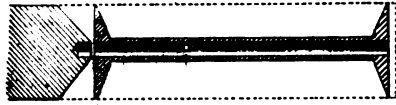
On termine avec le ciseau à deux tranchants. Le support étant légèrement relevé, le ciseau est tenu comme la plane, sa pointe droite un peu levée, de façon que l'on n'utilise pour couper que la partie moyenne. On lui donne un déplacement régulier, parallèlement à l'axe.

On termine le polissage, si l'on veut, au papier de verre.

Le cylindre ainsi tourné peut être pris par l'une de ses extrémités dans le mandrin américain.

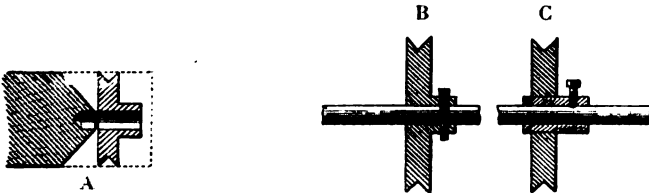
34. Tourner une surface plane. — Le porte-outil est placé en face du bout du morceau de bois, perpendiculairement à l'axe, à peine en dessous du plan du centre (I, 15). On dégrossit à la gouge. On termine avec le ciseau et le papier de verre.

35. Faire une bobine en bois. — On creuse la gorge de la bobine avec la gouge. Pour la détacher, on creuse la pièce en bois qui la prolonge en dressant la joue et échantonnant peu à peu pour gagner le centre, comme l'indique la figure.



Avant de détacher la pièce on peut y percer un trou centré comme s'il s'agissait d'un métal (I, 16). On peut aussi tarauder ce trou comme s'il s'agissait d'un métal.

36. Faire une poulie en bois. — Découper la poulie dans le bois comme l'indique la figure (A).



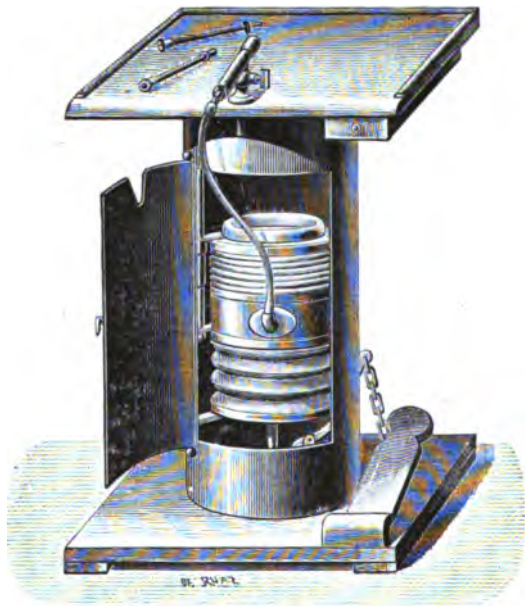
Pour la fixer sur un axe, on entre, en forçant, une goupille qui traverse à la fois la poulie et l'axe en métal (B).

On peut encore faire entrer dans le trou de la poulie, avant de la détacher, un cylindre de métal sur la surface duquel on a limé des faces planes parallèles aux génératrices. Dans ce métal, on perce un trou centré. On fixe la poulie sur l'axe définitif au moyen d'une vis qui vient buter dans un trou conique de cet axe.

TRAVAIL DU VERRE.

37. Soufflerie. — La soufflerie proprement dite est un cylindre de 20^{cm} de diamètre; elle est commandée par une pédale.

Elle supporte une petite table horizontale sur laquelle se trouve



le chalumeau et les différents accessoires.

Chalumeau. — Le gaz arrive dans l'espace annulaire, l'air dans le tube central. Ce tube central est formé d'un tube de métal guidant à son intérieur un tube en verre ou en métal. Le tube de caoutchouc qui amène l'air applique ce dernier tube sur le chalumeau et les fixe l'un par rapport à l'autre. Il faut un jeu de ces tubes intérieurs présentant à leur pointe un orifice de $0^{\text{cm}},1$ à $0^{\text{cm}},4$ de diamètre. Les petits diamètres donnent des flammes de faible section, les gros diamètres les grandes flammes. Les premiers conviennent aux soudures fines, les autres à la fabrication des boules, des pointes, des courbures, etc. La flamme est bien réglée lorsqu'il ne s'échappe pas au-dessus d'elle, en sortant du chalumeau, une

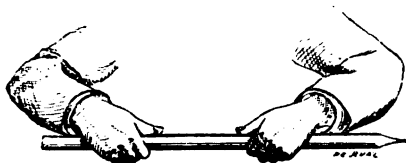


flamme éclairante de gaz non mélangé d'air. Le réglage se fait en modifiant le débit du gaz ou en enfonçant plus ou moins profondément le tube réglable.

Couteau à verre. — Lame d'acier, d'une fabrication spéciale (dimensions ordinaires : 0^{cm},15 ; 4^{cm} ; 15^{cm}). On l'affûte par frottement à sec sur un grès tendre, pour lui donner deux tranchants sur ses grandes dimensions. Le couteau n'a pas besoin d'être très aiguisé, mais sa surface frottante doit être souvent renouvelée sur le grès sec, sinon il ne mord pas.

Verre. — A chaque qualité de verre correspond un mode de travail particulier. Les procédés qui suivent ne conviennent pas au verre vert, difficilement fusible. Le verre convenable est blanc, légèrement jaunâtre, assez facilement fusible, ne se dévitrifiant pas. Le *verre allemand*, trop coûteux, est également bon.

38. Couper un tube. — Avec le couteau à verre. — Prendre le tube dans la main gauche, appuyer sur la table l'endroit où l'on veut faire le trait et y mettre l'ongle pour arrêter le couteau. Prendre le couteau à pleine main avec la main droite et, maintenant son plan perpendiculaire à l'axe du tube, appuyer en frottant avec toute la longueur de l'arête du couteau. Le trait étant



bien marqué, prendre le tube dans les deux mains, le trait en dessus, les pouces à 4^{cm} à 5^{cm} de part et d'autre du trait sur la même génératrice, *les bras éloignés du corps*. Tirer dans le sens de l'axe sans flexion. Si le tube résiste, accentuer le trait.

A la goutte de verre. — Prendre une pointe de verre de 0^{cm}, 2 de diamètre et fondre son extrémité. Poser la perle fondue à l'extrémité du trait de couteau. Une fêlure se produit. Placer la perle quelques millimètres plus loin. La fêlure la rejoint; on lui fait faire ainsi le tour du tube. Eviter d'appuyer trop la goutte de verre pour que son effet ne soit pas trop énergique.

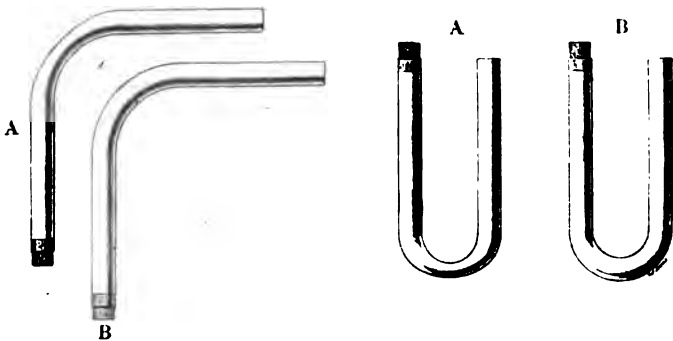
39. Courber un gros tube. — (*Grosse flamme*). Tenir le tube horizontalement dans les deux mains. Le chauffer en le tour-

nant entre les doigts en même temps qu'on lui donne un mouvement alternatif suivant son axe, de façon



que la partie chauffée ait 5^{cm} à 6^{cm} de long (voir la figure de la page suivante). Quand il est juste assez chaud pour pouvoir fléchir, cesser de tourner et chauffer d'un seul côté. Dès qu'il est rouge, le sortir de la flamme et le courber rapidement pour l'amener d'un seul coup à l'angle demandé. Le côté rouge, extérieur à la courbure, s'aplatit (A); mais, en soufflant immédiatement,

on amène la courbure à son diamètre (B). Pendant que le tube est encore chaud, on le met d'équerre, puis plan, en regardant si les



deux côtés se projettent l'un sur l'autre. — On fait de même un tube en U.

— Les tubes à gaz ordinaires ($d = 0^{\text{cm}}, 7$) peuvent être courbés dans la flamme du bec papillon. Le tube, tenu horizontalement dans les doigts, est chauffé sur une longueur de 5^{cm} ou 6^{cm} en même temps qu'on le fait tourner autour de son axe. Quand il est suffisamment mou, on le courbe à l'angle voulu.

40. Border un tube. — Tenir le tube dans la main gauche et le faire tourner entre le pouce et l'index en présentant l'extrémité à la flamme de façon que celle-ci chauffe l'intérieur et, rougissant les bords, ait une tendance à les rejeter vers l'extérieur. On évite ainsi de diminuer le diamètre du tube.

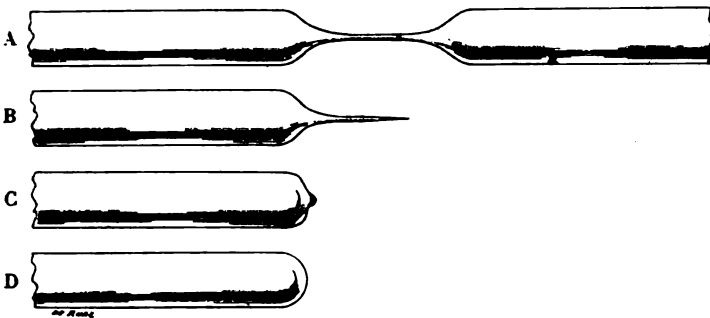
41. Tubes à essais. — Couper une longueur suffisante pour deux tubes. Chauffer le milieu en tournant avec les deux mains.



Sortir de la flamme et étirer ($d = 0^{\text{cm}}, 2$) (A).

Séparer les deux parties (B).

Rougir le tube (*petite flamme*) à la base de la pointe en tournant continuellement et doucement de la main gauche pendant que la droite soutient la pointe *sans tourner*. Tirer rapidement de



la main droite en continuant à tourner de la main gauche et à chauffer.

La pointe s'amincit et se coupe dans la flamme en ne laissant qu'une petite perle (C) que l'on refond, puis que l'on souffle

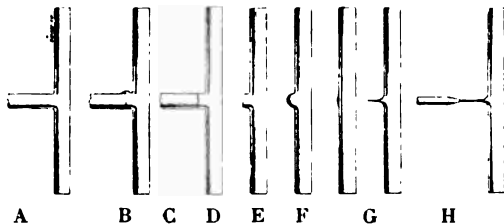
(doucement d'abord, puis fortement) pour amincir le fond. On refond alors la partie déformée et en soufflant on arrondit le fond du tube. On reconnaît qu'il est parfait en visant suivant l'axe (D).

42. Souffler une boule à l'extrémité d'un tube. — Chauffer fortement l'extrémité d'un tube à essais pour l'épaissir sur une longueur de 1^{cm}, 2^{cm} ou 3^{cm}. Souffler (doucement, puis fortement).



en ayant soin de ne pas cesser de tourner, si l'on veut que la boule soit ronde et centrée.

43. Soudure latérale. — Chauffer légèrement, en tournant, la section droite du tube passant par le point où l'on veut faire la soudure, puis cesser de tourner et rougir ce point (*très petite flamme pointue*). Coller sur la partie fondue l'extrémité d'une pointe de verre légèrement chauffée et tirer immédiatement. On étire ainsi une pointe (A) que l'on sectionne à la flamme (B). On



présente cette pointe à la flamme et on la refond (C). On souffle alors doucement et longtemps, de façon à former une petite boule (D). On refond cette boule jusqu'à moitié et en soufflant brusquement on la fait éclater et l'on obtient une ouverture circulaire de petit diamètre (E).

Boucher alors le tube à ses deux extrémités, le tenir verticalement dans la main gauche et rougir les bords du trou. En même temps on rougit, en le tenant de la main droite, l'extrémité du tube à souder. Coller les deux tubes et souffler fortement en tirant légèrement

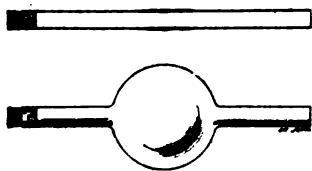


rement pour dégager la soudure (F). Rougir un côté de la soudure (*petite flamme*) et souffler longuement de façon à bien sortir la soudure (G). Refondre le même point une seconde fois pour bien mélanger le verre et souffler doucement pour ramener seulement au diamètre du tube. Opérer de même en quatre points équidistants sur la soudure. Enfin rougir légèrement le tube sur lequel on a fait la soudure en face de celle-ci (H).

44. Souder deux tubes bout à bout. — Étirer le plus gros, s'il y a lieu, pour l'amener au plus petit diamètre.

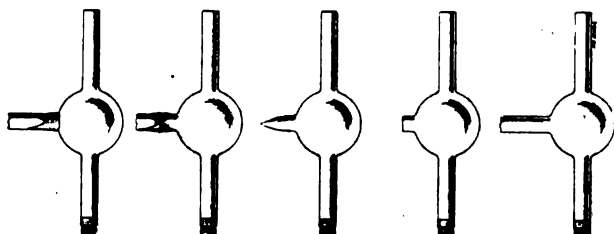
Fermer l'un des tubes, le tenir dans la main gauche, les doigts en dessus, et rougir les bords en tournant. Rougir de même le second tube tenu dans la main droite. Les sortir de la flamme et les coller légèrement en soufflant sans tirer. Refondre la soudure en quatre points comme plus haut.

A.

45. Souffler une boule au milieu d'un tube. —

Chaulfer le tube fermé à une extrémité en tournant très légèrement et refoulant de façon à rassembler un peu le verre. Le tout étant bien fondu, souffler (lentement, puis fortement), sans cesser de tourner, jusqu'au diamètre voulu.

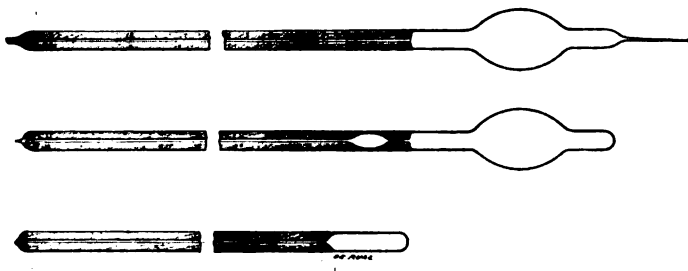
46. Souder un tube latéral sur une boule. — Prendre dans la main droite un tube ($d = 0^{\text{cm}}, 5$ environ) et fondre une extrémité pour en faire une baguette pleine.



De la main gauche présenter à la flamme le point de la boule où l'on veut faire la soudure, de façon à le chauffer sans déformer la boule. Coller la baguette fondue sur la boule et souffler (doucement, puis fortement) en étirant légèrement.

Fondre et fermer l'extrémité de la tubulure ainsi rapportée sur la boule. Ouvrir, en faisant éclater le verre, l'extrémité de cette tubulure sur laquelle on fera une soudure bout à bout.

47. Enveloppe de thermomètres. — Il faut d'abord élargir le

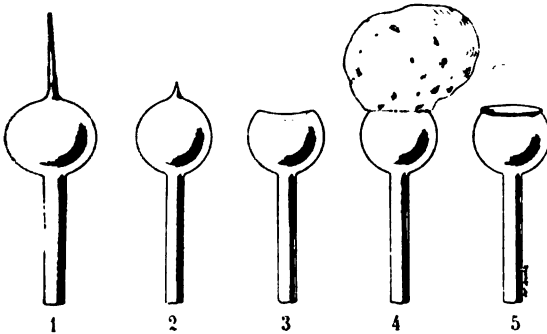


canal du tube capillaire et amincir la paroi de manière à obtenir uné amorce de tube de la largeur du réservoir que l'on veut souder. Pour

cela on soude provisoirement, bout à bout, au tube capillaire un tube ordinaire ($d = 0^{\text{cm}},5$ environ) sur lequel on a soufflé une boule.

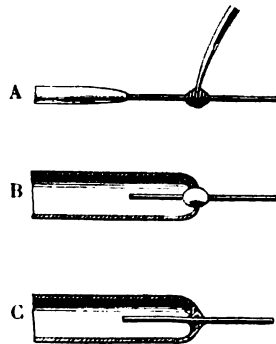
On rougit fortement le tube capillaire près de la soudure et l'on passe rapidement la boule dans la flamme. La dilatation de l'air fait alors gonfler le tube capillaire et forme une petite ampoule que l'on coupe au milieu. — C'est sur cette amorce de tube que l'on soudera le réservoir à la manière ordinaire (I, 44).

48. Souffler un entonnoir à l'extrémité d'un tube. — Tirer une pointe à l'extrémité du tube et souffler par cette pointe une boule épaisse légèrement ovoïde (1). Déboucher l'autre extré-



mité du tube et détacher la pointe de la boule à la flamme, comme pour un tube à essais (2). Fondre cette extrémité (3), puis faire éclater le verre (4). Égaliser les bords avec le couteau, puis chauffer rapidement le tour en fondant les bords sans cependant les faire rentrer en dedans (5).

49. Souder un fil de platine à un tube. — Le platine doit être propre et très lisse; on le tient avec une pince ou plus simplement en lui collant à chaud une pointe de verre. Ceci fait, on étire une petite baguette de verre sur le tube que l'on veut souder, puis, chauffant au rouge blanc l'extrémité du platine, on l'entoure avec la baguette étirée d'une petite masse de verre (A), de façon à obtenir une perle traversée par le fil.



L'extrémité du tube sur lequel on veut faire la soudure est préparée de façon que son ouverture ne puisse

pas laisser passer la perle. Le fil de platine étant mis en place (B), on chauffe fortement jusqu'à fusion la perle et le bout du tube. On souffle *fortement* pour repousser l'endroit fondu (C). Pendant ces opérations, il faut, autant que possible, rougir le fil sur toute sa longueur. On termine en recuisant dans la *flamme morte* (sans air) pour éviter un refroidissement brusque.

SUPPLÉMENT AU CHAPITRE I.

RECETTES DIVERSES.

50. Alliage fusible pour scellements.

Étain.....	9
Plomb.....	9
Bismuth.....	1

Cet alliage se dilate par sa solidification (155).

51. Alliages fusibles. — *Alliage de Darcet*, fondant vers 95° :

Bismuth	8
Plomb.....	5
Étain.....	3

On peut se servir de cet alliage comme bain liquide jusqu'à une température voisine du rouge (171).

Alliage de Wood, fondant vers 70° :

Bismuth.....	8
Étain.....	4
Cadmium.....	2
Plomb.....	2

52. Aluminium. — On peut écrire sur le verre bien propre avec un morceau d'aluminium que l'on devra, seulement, appuyer assez fort. Les traits que l'on trace ainsi sont conducteurs du courant électrique (39).

53. Amalgame fondant vers 50° (155) :

Alliage de Darcet.....	9
Mercure.....	1

54. Amalgameur un métal. — Dans le cas du cuivre ou du zinc, on décape le métal et on le frotte avec un tampon imprégné d'azotate de mercure.

On peut amalgameur le fer en l'humectant un peu et en le frottant avec de l'amalgame de sodium (177).

L'aluminium bien propre s'amalgame irrégulièrement en écrasant sur le métal des gouttelettes de mercure et en frottant énergiquement. L'amalgame qui se forme est éminemment altérable. Il s'oxyde à l'air, et l'on voit pousser sur l'aluminium une chevelure d'alumine qui croît littéralement à vue d'œil.

55. Arcanson. — Fondre de la résine et la chauffer au-dessus de 100° pour chasser l'humidité. Ajouter ensuite à la résine environ moitié de son poids de cire d'abeille. Un excès de cire donne un arcanson mou, tandis qu'un excès de résine rend le mélange cassant.

— On peut remplacer la cire d'abeille par un corps meilleur marché, la *cérésine*, qui s'extrait des résidus de distillation des pétroles.

56. Argenture du verre. Procédé Lumière. — *Nettoyages.* — Les glaces à argenter et les cuves, d'abord bien nettoyées, doivent être en outre énergiquement frottées avec un tampon de coton imprégné d'acide azotique, rincées, nettoyées à l'ammoniaque et rincées de nouveau : on ne doit plus les toucher avec les doigts.

Liqueurs. — 1° Solution à 2 pour 100 de nitrate d'argent ammoniacal pur dans l'eau distillée; 2° Formol du commerce (à 40 pour 100).

Essai des liqueurs. — Essayer 15^{cm³} de la liqueur argentifère avec 7 gouttes de formol. Si la dose convient, le liquide devient en quelques secondes rose violacé foncé, puis, brusquement, les parois sont couvertes d'un enduit qui devient successivement rose violet, puis bleu, gris de fer et prend enfin l'aspect de l'argent poli pendant que le liquide se recouvre de paillettes.

Les résultats sont, en général, meilleurs si la solution de nitrate d'argent ammoniacal a été récemment préparée.

La réduction, qui dure à peu près une minute, est terminée quand le liquide, presque limpide, contient des grumeaux bien nets. Si le dépôt tarde à se faire, on peut chauffer vers 20°.

S'il y a excès de formol, le dépôt se fait beaucoup plus vite, l'argent ne prend pas l'aspect métallique ou, en tous cas, la couche

métallique disparaît sous le frottement du doigt lavé à l'eau ammoniacale.

S'il y a défaut de formol, on obtient un liquide *gris boueux*.

Argenture. — La glace est retournée dans la cuve (une cuvette photographique), la face à argenter en dessous, en la soutenant avec des cales de verre. On fait un mélange intime des deux liqueurs, en les transvasant rapidement deux ou trois fois d'un verre dans un autre, et l'on verse de suite dans la cuve (il est inutile que la glace soit recouverte).

Après rinçage à l'eau distillée et séchage, on peut polir au rouge d'Angleterre avec une peau de chamois si l'on tient à faire disparaître le voile très léger qui reste.

On argente plus facilement un vase en verre (ballon, tube à essais) en y versant le mélange liquide.

Une glace argentée peut être utilisée pour la gravure à l'acide fluorhydrique; l'argent protège le verre contre l'attaque des vapeurs, mais les traits à graver auront dû être tracés aussitôt après l'argenture, car le métal devient rapidement très dur (36, 77).

57. Attaches pour fils de cuivre fins. — On peut souder le fil, soit à un fil plus gros, soit le long du bord d'une plaque de cuivre ($1^{\text{cm}}, 5 \times 1^{\text{cm}}, 5 \times 0^{\text{cm}}, 5$) échancrée de manière à pouvoir être facilement serrée dans la borne. — Les *fils souples*, formés d'un grand nombre de brins, se manœuvrent plus facilement si l'on soude tous ces brins ensemble, à l'extrémité du fil, et mieux encore si on les introduit dans un petit tube de laiton où on les fixe par un grain de soudure (177).

58. Bois fendifs. — Pour clouer ces bois, on doit écraser la pointe du clou d'un coup de marteau pour que le clou *déchire* les fibres en pénétrant dans le bois.

59. Brûlures. — Mettre *immédiatement* sur les brûlures une solution saturée d'acide picrique. Si la brûlure n'est pas très grave, on supprime ainsi la douleur et il ne se produit pas d'ampoules.

60. Caoutchouc. — Le caoutchouc s'altère sous l'action de l'air et de la lumière. On favorise donc sa conservation en le gardant dans de l'eau et à l'obscurité. — Si des bouchons de caoutchouc commencent à durcir, on peut les régénérer en les laissant pendant quelques jours dans de l'eau ammoniacale.

Pour *coller* le caoutchouc, on emploie une solution de *caoutchouc para* dans la benzine. Après avoir frotté les surfaces à coller

avec du papier de verre, on les enduit d'une couche légère de cette solution, puis on les applique et on les presse l'une contre l'autre et on laisse sécher quelques minutes sous pression.

61. Chatterton. — Mastic isolant formé de :

Goudron de Norvège.....	1
Résine.....	1
Gutta.....	3

On trouve dans le commerce de la tresse enduite de chatterton (177).

62. Colle d'amidon. — Délayer de l'amidon de riz dans dix fois son poids d'eau froide, et verser dans une quantité égale d'eau bouillante. Chauffer ensuite le liquide, sans le faire bouillir, et en agitant bien, jusqu'à ce que la masse devienne pâteuse et opaline.

63. Colle pour le celluloïd. — Dissolution de celluloïd dans l'acétone (177).

64. Colle pour les métaux et le verre. — Ramollir de la colle forte dans l'eau. Rejeter l'excès d'eau et ajouter ensuite à la colle un quart de son poids de glycérine ou de mélasse que l'on incorpore en chauffant doucement (195).

65. Coller un miroir de galvanomètre. — On recommande le mastic de plomb (I, 93) qui a l'inconvénient d'être un peu long à sécher (207).

On emploie aussi la colle à caoutchouc et même le suif.

66. Colles pour le verre. — Pâte faite de silicate de sodium sirupeux du commerce et de kaolin pulvérisé que l'on y incorpore soigneusement dans un mortier. Les pièces collées avec ce ciment ne peuvent se décoller que très difficilement et après avoir trempé pendant plusieurs jours dans une solution de potasse.

Cette composition convient parfaitement pour mastiquer des tiges de verre dans des garnitures métalliques en laiton.

— On peut aussi coller le verre avec une solution sirupeuse qu'on filtre à la trompe, et qui contient :

Eau.....	4
Gomme arabique.....	1
Sucre.....	1

Les joints obtenus résistent au sulfure de carbone; mais, naturellement, ils se défont dans l'eau.

67. Coller du papier d'étain sur du verre. — Poser

d'abord le papier d'étain sur une plaque de verre propre et effacer les plis en frottant doucement avec la main ou avec un tampon.

La surface à recouvrir d'étain est, d'autre part, enduite d'une couche de *suif* aussi légère que possible que l'on étend avec un chiffon.

On pose la feuille d'étain sur la surface suiffée, et l'on fait adhérer le métal en frottant lentement, mais assez énergiquement, avec la main, ou avec une gomme molle de caoutchouc que l'on mouille pour qu'elle n'arrache pas l'étain. Il faut avoir soin de frotter en allant du centre vers les bords pour chasser les bulles d'air et l'excès de suif.

— Pour souder un fil métallique sur la feuille de papier d'étain, on étame le bout du fil, on le pose sur l'étain et l'on fait tomber sur lui une goutte de soudure fondue. Il ne faut pas appliquer le fer à souder qui fondrait l'étain autour de la goutte de soudure. — On peut aussi souder le fil sur une plaque de clinquant, étamer la face inférieure de cette plaque, et la souder sur le papier d'étain en la touchant en son milieu avec le fer (45).

68. Colle forte liquide. — Ramollir de la colle forte dans l'eau, rejeter l'excès de liquide, et incorporer à chaud, dans la colle, un quart de son poids d'acide acétique ordinaire.

69. Colles imputrescibles. — On favorise beaucoup la conservation des colles fermentescibles en y ajoutant quelques gouttes de formol (87).

70. Couper un carreau de verre au diamant. — Tenir le manche du diamant verticalement, les doigts très près du verre à couper. Le diamant ne coupe que dans un sens, que l'on suit naturellement si l'on applique sur la règle qui guide l'outil la face qui porte comme repères deux points blancs. On doit déplacer l'outil parallèlement à lui-même de gauche à droite sans appuyer. Le trait se produit avec un certain cri aigu; il est très fin et n'a pas éraillé le verre quand il est parfaitement réussi.

Avec le verre à vitres on sépare les deux morceaux par une flexion à l'une des extrémités. Avec la glace, il est souvent nécessaire de provoquer la fuite par des coups donnés sur la face non rayée avec le manche de l'outil servant de marteau.

— On peut fixer le carreau de verre dans un cadre en bois par la méthode bien connue employée par les vitriers.

71. Couper un gros tube de verre ou un flacon. —

Amorcer la coupure par un trait de lime ou de couteau à verre faisant le tour du tube. Mettre de part et d'autre de ce trait, et à 3^{mm} d'intervalle, deux bandes bien mouillées de papier filtre ou de chiffon faisant deux ou trois fois le tour du tube.

Chauffer ensuite le tube dans la flamme du chalumeau en le tournant sur lui-même. Si le tube ne se coupe pas spontanément, il suffira de refroidir brusquement la partie chauffée en y versant de l'eau, pour qu'il se produise une cassure très nette.

— Si l'on dispose du courant électrique, on peut couper le tube en le chauffant le long du trait de lime avec un fil de fer ($d = 0^{\text{cm}}, 1$) que l'on porte au rouge avec un courant de quelques ampères et en refroidissant brusquement avec de l'eau.

— On peut aussi produire cet échauffement local au moyen du frottement. On passe de la ficelle forte (dite *fouet*) autour du tube ou du flacon, et l'on place ce flacon sur un support en V qui permet le passage de la ficelle. Deux personnes tirent alors fortement sur cette ficelle en sens opposés et lui impriment un mouvement de va-et-vient qui échauffe rapidement le verre. Lorsque la ficelle commence à fumer, on arrose le flacon d'eau froide et la rupture se produit.

72. Courber une tige de métal. — Le fer se courbe très bien au rouge sombre. — Le laiton doit être courbé à *froid* en s'y reprenant à plusieurs reprises, après avoir recuit le métal au rouge sombre dans l'intervalle.

— Pour faire un S, on courbe une tige de laiton ($d = 0^{\text{cm}}, 5$) autour d'une barre pleine ($d = 1^{\text{cm}}, 5$) fixée dans l'étau.

73. Courber un tube de métal. — On évite l'aplatissement du tube en le remplissant de sable ou de plomb fondu que l'on retire ensuite.

74. Crayon pour écrire sur le verre. — On malaxe ensemble :

Spermaceti	4
Suif.....	3
Cire.....	2
Matière colorante	6

On peut prendre comme matières colorantes du minium, du bleu de Prusse ou de la céruse (182).

75. Déboucher un flacon fermé par un bouchon de verre rodé. — Chauffer modérément le goulot du flacon dans la

flamme d'un bec Bunsen en tournant rapidement le flacon sur lui-même.

76. Décapage des métaux. — On nettoie un objet métallique en le frottant avec un chiffon couvert de tripoli et d'un peu d'huile. On achève le nettoyage avec de l'eau de savon.

Décapage chimique. — Dégraisser d'abord l'objet dans une solution chaude de soude caustique à 30 pour 100. Après ce dégraisage, on ne doit plus toucher l'objet avec les doigts.

Faire ensuite deux immersions dans le bain de décapage formé de

Acide azotique.....	2 volumes
Acide sulfurique.....	1 volume

On rince immédiatement si l'on ne veut pas que la surface devienne mate (207).

77. Dessiner sur le verre. — Sur du verre dépoli, on écrit ou l'on dessine au crayon. On peut rendre ensuite au verre toute sa transparence en le recouvrant à chaud d'un vernis à l'alcool.

Si l'on veut écrire sur du verre ordinaire, on n'a qu'à le recouvrir du vernis suivant :

Alcool.....	100
Mastic.....	7
Sandaraque.....	3

Les applications de vernis doivent toujours se faire à chaud pour qu'il ne se condense pas d'humidité sur le verre pendant l'évaporation de l'alcool (182).

78. Dévisser une vis bloquée. — *Vis à bois.* — Chauffer fortement la tête de la vis avec une tige de fer rougie au feu, puis prendre le tournevis.

Vis à métaux dont la tête est cassée. — On perce un trou dans le morceau de vis qui reste, on y enfonce la pointe d'un tiers-point dont les trois pans ont été affûtés à la meule et l'on tourne dans le sens convenable (45).

79. Diélectrine. — On trouve sous ce nom, dans le commerce, un produit (breveté) qui se travaille très bien et qui isole d'une manière pour ainsi dire parfaite.

Sans arriver à une aussi grande perfection, on obtient encore d'excellents résultats avec deux compositions qu'on prépare ainsi :

1° Fondre du soufre et le chauffer jusqu'à 130° sous une légère couche de paraffine en agitant avec une baguette de verre, comme si l'on voulait incorporer la paraffine dans le soufre. On obtient par refroidissement une masse brune qui n'est presque que du soufre, mais qui est beaucoup moins fragile que le soufre en canons.

2° Chauffer de la paraffine et la maintenir à 105°, en plaçant, par exemple, le vase qui la contient, dans un bain-marie à eau salée. Incorporer progressivement dans cette paraffine chaude de la fleur de soufre, de manière à former une pâte très épaisse. On obtient, par refroidissement, un corps qui isole aussi bien que la paraffine, mais qui a plus de solidité.

80. **Ébonite.** — On scie, on lime et l'on tourne l'ébonite comme le laiton. Mais c'est une matière cassante, qui ne doit être travaillée qu'avec des outils très bien affûtés pour que la matière soit coupée sans effort d'arrachement. Pour le travail sur le tour, en particulier, le burin doit attaquer la pièce *au-dessus* de l'axe.

A 100°, l'ébonite devient souple comme du cuir. On peut profiter de cette propriété pour la fabrication des petits objets que l'on peut prendre dans de la feuille d'ébonite ($e = 0^{\text{cm}}, 2$).

81. **Empois d'amidon.** — Délayer de l'amidon dans 10 fois son poids d'eau froide et verser dans une quantité quadruple d'eau bouillante.

82. **Encre pour écrire sur le verre.** — Faire au bain-marie une solution contenant :

Essence de lavande.....	32 parties
Copal en poudre.....	5 parties

Colorer ensuite par du noir de fumée, de l'indigo ou du vermillon (155).

83. **Encre pour graver le verre.** — Saturer de l'acide fluorhydrique du commerce par de l'ammoniaque, et rajouter au liquide un volume d'acide égal au premier. On épaissit un peu cette encre avec du sulfate de baryum en poudre fine.

On peut écrire avec une plume métallique. L'encre mord presque immédiatement sur le verre, et il n'y a plus qu'à laver à l'eau (155).

84. **Encre indélébile.** — Encre de Chine et soude caustique à un degré Baumé (155).

85. Encre pour polycopie. — C'est une solution concentrée de couleur d'aniline. On peut prendre (155) :

Eau.....	100
Alcool	10
{ Violet de méthylaniline (<i>dit</i> BBB).....	10
{ <i>Ou bien</i> acétate de rosaniline.....	20

86. Étamer le verre. — On étale au tampon sur une glace *bien propre* de l'alliage de Margot composé de :

Étain.....	100
Zinc	3

87. Fibre. — La fibre est un isolant passable. On la travaille à froid et à chaud comme l'ébonite (**I, 80**).

88. Glissement des courroies. — On évite ce glissement en jetant quelques pincées de résine pulvérisée entre la poulie et la courroie.

89. Glu marine. — Laisser en contact pendant 3 à 4 jours :

Caoutchouc.....	1 partie
Huile de goudron.....	3 parties

Décanter ensuite le liquide, et y dissoudre à chaud

Gomme laque.....	3 parties
------------------	-----------

Cette composition s'applique à chaud et résiste aux acides. Elle convient très bien pour rendre étanches des bacs en bois. — Elle sert aussi pour sceller dans leurs garnitures métalliques les tubes de verre qui doivent résister à une forte pression (155).

90. Gomme-laquer le verre. — L'objet étant bien propre, on y étend au pinceau une solution alcoolique saturée de gomme laque. Ce vernis sèche en quelques minutes. S'il avait été appliqué à froid, il donnerait un dépôt opaque; il conviendrait alors de chauffer doucement l'objet jusqu'à ce que la gomme laque fonde.

91. Jonctions des fils et des câbles électriques. — Le cuivre ayant été mis à nu et décapé au papier émeri sur une longueur égale à une vingtaine de fois son diamètre, on tord l'un sur l'autre les brins correspondants des deux conducteurs. On peut alors souder les deux câbles, mais cette soudure doit être faite *à la résine* pour n'introduire aucun corps acide (**I, 11**).

On rentre ensuite les pointes des fils vers l'intérieur et l'on recouvre d'abord le cuivre de plusieurs épaisseurs de bandes de *gutta en feuille*, puis on achève sa protection avec du ruban au chatteredon (I, 61). Ces isolants peuvent être soudés entre eux avec un fer tiède qui les fond à moitié sans les brûler; on achève de les faire adhérer en les pétrissant avec les doigts humides.

92. Mastics fusibles. — *Mastic de Faraday.* — C'est le type des mastics fusibles; il se compose de :

Résine.....	5 parties
Cire d'abeille.....	1 »
Ocre rouge <i>ou</i> rouge de Venise...	1 »

On le coule en bâtons de la grosseur d'une bougie, dans des moules en papier préalablement mouillés (138, 155, 207).

Mastic de Regnault. — On le trouve dans le commerce sous le nom de *cire Golaz*. Il peut être remplacé le plus souvent par de la cire à cacheter ou par un produit plus économique, le *mastic des fontainiers*, dont la composition est (177) :

Résine.....	3
Cire.....	1
Suif.....	1
Brique pilée.....	4

Masticages. — Pour faire un joint étanche avec ces mastics, on s'assure d'abord que les pièces sont bien sèches. On les chauffe alors doucement avec une petite flamme de gaz ($l = 2^{\text{cm}}$) allumée au bout d'un tube effilé ($d = 0^{\text{cm}}, 1$) et l'on y fond sur place la quantité de mastic nécessaire. Pendant le refroidissement, on donne à la masse de mastic la forme convenable en le pétrissant avec les doigts mouillés. Lorsque le mastic commence à durcir, on le refond sur la ligne de raccordement avec la surface des objets à souder, afin que le contact soit absolument intime.

93. Mastic au fer. — On obtient une matière qui fait prise à froid et très vite en faisant une pâte formée d'un peu d'eau et de :

Limaille de fer.....	98 parties
Fleur de soufre.....	1 »
Sel ammoniac.....	1 »

Si l'on remplace le soufre par un poids égal de sel ammoniac, le mastic peut aller au feu (155).

94. Mastic au plomb. — Malaxer ensemble poids égaux d'huile de lin et de céruse *ou* de minium *ou* d'un mélange de ces deux corps. Conserver en boîte fermée.

95. Mastic peu fusible. — Il s'applique à froid sur les joints des briques ou des pièces de porcelaine; on laisse sécher, et l'on peut ensuite porter au feu. Sa composition est la suivante (155) :

Silicate de sodium.....	1
Magnésie calcinée.....	1
Oxyde de zinc.....	1

Mastics divers. — Voir : alliages, arcanson, colles, glu, plâtre.

96. Nettoyage du mercure. — *Nettoyage mécanique.* —

On filtre le mercure à travers un cône de papier percé de trous d'épingle, ou bien avec un entonnoir dans la douille duquel on a mastiqué un morceau de jonc ($l = 5\text{cm}$).

Purification chimique. — Faire couler le mercure en mince filet dans de l'acide azotique, laver ensuite à l'eau, sécher au papier buvard et distiller dans le vide. On peut aussi mettre le mercure pendant un jour ou deux en présence d'une solution sulfurique de bichromate de potassium en agitant de temps à autre, et distiller ensuite.

Pour la distillation dans le vide on se sert avantageusement de l'appareil de M. Gouy. On l'amorce en faisant le vide à la trompe à eau dans le flacon inférieur pendant qu'on chauffe le mercure du ballon. Les premières gouttes de mercure qui distillent forment trompe et entraînent peu à peu le reste de l'air contenu dans l'appareil.

97. Nettoyage du verre. — *Verres d'optique.* — Laver à l'eau de savon ou à l'eau ammoniacale, rincer à l'eau distillée et sécher ensuite. Pour essuyer les verres d'optique, il faut employer une étoffe très douce. Le mieux est de se servir d'une mousseline *neuve*



assouplie par un lavage à l'eau bouillante; on prendra, par exemple, la mousseline dite à *cataplasmes* ou la mousseline dite *cheese cloth* (207).

Tubes de verre. — Dans la plupart des cas un rinçage à l'eau suffit, et l'on sèche avec un tampon de papier filtre ou de papier de soie que l'on promène dans le tube avec une ficelle. Si le tube a contenu du mercure, on y fait d'abord séjourner de l'eau de chlore pendant quelques heures (73).

— Pour les expériences qui demandent une netteté parfaite des surfaces, on fait agir successivement une solution légèrement sulfurique de permanganate de potassium, puis de l'eau régale et enfin de l'ammoniaque, en séparant chaque lavage par un rinçage à l'eau distillée. On finit par d'abondants lavages à l'eau distillée.

Si l'appareil doit être sec, on y fait passer un courant d'air filtré à travers un tampon de coton; il ne faut ni essuyer ce qui apporterait des poussières, ni sécher à l'alcool qui laisse toujours des dépôts.

98. Noircir les métaux. — *Noircir le laiton à chaud.* — On dégraisse bien la pièce avec une solution de potasse, puis on lave. On chauffe ensuite la pièce et on la plonge soit dans une solution à 1 pour 100 de chlorure de platine, soit dans de l'acide azotique contenant 1 pour 100 d'azotate d'argent. L'objet est enfin séché à la flamme.

Noircir le laiton ou le zinc à froid. — Dégraisser le métal, et le mouiller avec du *vert antique*, solution acétique de sels de cuivre qu'on trouve couramment dans le commerce. On laisse sécher et l'on brosse ensuite avec de la plombagine.

99. Paraffiner le bois, le papier, etc. — On fond de la paraffine dans une cuve suffisamment grande qui peut être faite en fer-blanc et soudée à l'étain, mais qu'il vaudra mieux river. Les objets à traiter sont maintenus dans la paraffine à 110°-120°, jusqu'à ce qu'ils ne dégagent plus sensiblement de bulles de vapeur. Il serait nuisible de chauffer plus fort ou plus longtemps, car on altérerait la cellulose.

100. Pâte à porcelaine. — Mélanger intimement dans un mortier

Kaolin.....	6 parties
Quartz pulvérisé.....	2 »
Feldspath.....	1 »

ajouter de l'eau et malaxer pour obtenir une pâte très homogène.

101. Pâte pour polycopie. — Préparer à chaud une solution de gélatine contenant :

Eau.....	300 ^g
Gélatine.....	100 ^g

Ajouter ensuite 700^g de glycérine, agiter, passer au tamis et recueillir le liquide dans une cuvette en zinc à bords relevés (22^{cm} × 18^{cm} × 2^{cm}). On enlève avec une carte les bulles d'air et la mousse qui ont pu se former, et la pâte se prend par refroidissement (155).

102. Percer des trous dans le verre. — Jusqu'à un diamètre de 0^{cm}, 5, on se sert d'une mèche bien trempée montée sur le tour ou sur un *drille*, ou bien de la pointe d'une lime *tiers-point* affûtée à la meule. Il faut seulement que l'outil soit constamment mouillé avec de l'essence de térébenthine contenant moitié de son poids de camphre ou bien avec du pétrole (kérosène). — On peut aussi travailler le verre sur le tour ou à la lime en le mouillant avec ces liquides.

• Dans tous ces travaux il faut que la vitesse linéaire au point de contact ne dépasse pas 5^{cm} à la seconde.

103. Plâtre gommé. — Le plâtre, gâché avec une solution de gomme arabique à 5 pour 100, est plus dur et moins poreux que le plâtre gâché à l'eau.

104. Redresser une tige de laiton ($d < 0^{\text{cm}}, 6$). — On serre la tige par un bout dans le mandrin du tour. On la saisit à pleine main dans la main droite, le pouce en dessous, puis, maintenant le pouce au niveau de l'axe, on appuie franchement avec la paume de la main pour que la tige fléchisse un peu autour du pouce.

On met alors le tour en mouvement et l'on transporte lentement la main ainsi placée d'un bout à l'autre de la tige. Cette tige fléchit et se tord d'une manière complexe et l'effet produit est de redresser la tige en l'écrasant fortement.

105. Redresser un tube de laiton. — Si l'on dispose d'un tour à axe creux, on fixe le tube dans le mandrin, mais en serrant assez doucement pour qu'en le retenant à la main on puisse empêcher le tube d'être entraîné. On met le tour en mouvement en maintenant le tube immobile, puis on l'enfonce lentement dans l'axe creux du tour : les mâchoires du mandrin tournent autour du tube et lui donnent une forme très régulière (45).

106. Quartz fondu. — On commence par *étonner* les cristaux de quartz en les chauffant au rouge dans un creuset en terre et en les jetant dans l'eau froide, puis on les concasse grossièrement.

On travaille ensuite le quartz avec un chalumeau analogue à celui qui sert pour la lumière oxydrique; le diamètre de l'orifice de sortie doit avoir environ $0^{\text{cm}}, 2$. On règle les robinets de gaz et d'oxygène de manière à avoir une flamme silencieuse où le cône bleu intérieur ait environ $0^{\text{cm}}, 2$ de haut (45, 163).

Baguettes. — Porter dans la pointe du cône bleu un fragment de quartz tenu par une pince métallique. Ce quartz subit la fusion pâteuse, on l'accôle à un autre morceau de quartz et l'on continue ainsi en étirant progressivement les morceaux de quartz pâteux de manière à constituer une baguette à peu près régulière.

Ces baguettes rendent de très grands services comme supports isolants. Pour les nettoyer, il suffit de les chauffer au rouge : la silice fondue peut être chauffée ou refroidie aussi brutalement qu'on le voudra sans crainte de rupture (45, 163, 207).

Tubes. — Pour faire un tube de silice fondue, on enroule ces baguettes dans la flamme du chalumeau de manière à constituer une hélice dont les spires se touchent. On refond cette masse de quartz point par point en bouchant les trous avec une baguette auxiliaire. Puis on la fond sur une plus grande étendue et on lui donne peu à peu sa forme définitive en soufflant dans le tube de silice avec un tube de caoutchouc.

Ces tubes ne peuvent se souder ni au verre ni au platine. On les réunit aux tubes de verre des appareils par des rodages qui peuvent être *collés* au silicate (45).

Fils. — On obtient les fils en étirant les baguettes de silice obtenues précédemment. Le fil sera d'autant plus fin qu'il aura été étiré plus vite.

Le procédé qui donne les fils les plus fins ($d = 1^{\mu}$) consiste à étirer lentement une baguette mince *en la laissant dans la flamme*. Quand la partie fondue est devenue suffisamment fine, elle est entraînée par le jet de gaz avec une très grande vitesse, et elle fournit un fil très fin mais assez court ($l = 50^{\text{cm}}$) qui reste attaché à la partie de la baguette qui n'a pas été fondue (45, 163, 207).

Fixer les fils de silice. — On peut fixer ces fils avec un vernis à la gomme laque que l'on fait fondre en approchant un corps chaud.

On peut aussi argenter le bout du fil (I, 56), puis le cuivrer

par galvanoplastie avec un courant d'environ $\frac{1}{100}$ d'ampère. On dépose une épaisseur de cuivre à peu près égale au rayon du fil et l'on peut souder sur ce cuivre à la manière ordinaire. Il faudra ensuite enlever l'excès d'argent et, surtout, l'excès de cuivre avec de l'acide azotique, si l'on ne veut pas que la torsion du métal produise des déplacements du zéro (45, 163).

107. Roder le verre. — Mettre du sable fin et de l'eau sur une plaque de verre, et frotter bien uniformément sur cette plaque l'objet à roder. Ce travail donne un dégrossissage qui est bien souvent suffisant. On peut obtenir un grain plus fin en continuant avec de l'émeri de plus en plus fin au lieu de sable.

108. Rouille. — On évite la rouille des objets en fer ou en acier en les conservant sous une couche de vaseline ou dans de la poudre de talc.

109. Souder l'aluminium. — Quand le métal est *très propre*, on peut le souder avec l'alliage de Margot; c'est-à-dire avec de l'étain contenant 3 pour 100 de zinc.

110. Soudure métallique du verre. — *Procédé Margot.* — On fond ensemble :

Étain.....	100
Zinc.....	3

Cette soudure adhère au verre quand il est tout à fait propre. On s'en sert comme d'un mastic fusible (177).

Procédé Cailletet. — On commence par platiniser le verre. Pour cela, on le fait tiédir, puis on le recouvre au pinceau d'une couche d'*huile de camomille* additionnée de *chlorure de platine*. On chauffe ensuite doucement, pour chasser l'excès d'*huile essentielle*, puis de plus en plus fort et presque au rouge, pour réduire le sel de platine et incorporer le métal dans la surface du verre.

Sur la surface métallique ainsi préparée, on fait un dépôt galvanique de cuivre et l'on soude ensuite par les procédés ordinaires.

111. Taches grasses. — On enlève ces taches à froid en recouvrant l'objet taché avec de la terre à foulon, appelée aussi terre de Sommières.

112. Tambour gradué. — On fait sur le tour un disque ayant un diamètre de 3^{cm}, 18. La circonférence vaut par conséquent 10^{cm}. On applique sur cette circonférence un décimètre divisé en millimètres, que l'on prend à un *mètre* en laiton et l'on soude (20).

113. Taraud. — Quand on doit reconstituer le taraud correspondant à des vis en fer, on peut opérer ainsi :

On façonne la vis à la lime de manière à lui donner la forme d'un taraud (I, 7), et l'on équarrit la tête de la vis pour pouvoir prendre le taraud dans un étou.

La vis est ensuite noyée dans une poudre formée de parties égales de charbon de bois et de ferrocyanure de potassium. Le tout est enfermé dans un petit creuset qu'on chauffe au rouge pendant une demi-heure. Le filet de la vis se transforme alors en acier par cémentation.

On trempe le taraud en le chauffant au rouge cerise et en le jetant dans l'eau froide. On polit l'une des faces de ce taraud au papier d'émeri, puis on recuit la pièce en la chauffant modérément au-dessus d'une flamme, jusqu'à ce que la face polie prenne une couleur brune après être devenue jaune. A ce moment on jette de nouveau l'objet dans l'eau froide.

Le taraud ainsi préparé a une dureté suffisante pour mordre dans le fer ou dans l'acier non trempé; et il a perdu beaucoup de la fragilité qu'il avait avant d'avoir été recuit (32).

114. Vernis. — *Vernis ordinaire.* — C'est une solution contenant environ 8 parties de gomme laque blanche pour 100 parties d'alcool.

— On en fait un *vernis jaune d'or* pour le laiton en y ajoutant un peu de *gomme gutte* (177).

Ces vernis s'appliquent au pinceau souple sur des surfaces assez chaudes pour que le séchage se fasse à chaud; mais il ne faut pas que la température dépasse le point d'ébullition de l'alcool.

Vernis noir très mat. — S'obtient en incorporant du noir de fumée dans du vernis ordinaire ou dans de l'essence de térébenthine.

115. Verres. — On fera bien d'essayer le verre à souffler en le chauffant un peu brutalement : le verre ne doit pas éclater. On peut aussi essayer de couper un tube par le procédé de la goutte de verre (I, 38) : le verre mal recuit a une tendance à donner des fêlures longitudinales.

En principe, le verre à souffler doit être acheté dans une maison très sérieuse ou chez un souffleur de verre.

Différentes espèces de verre. — On ne soude très bien ensemble que des verres de même espèce. S'il en est ainsi, l'endroit de la soudure n'est pas apparent. Si les verres sont d'espèces différentes,

on voit toujours la surface de raccordement de deux pièces et la soudure est fragile.

Le nombre des variétés de verre est infini, mais les tubes se font en général en trois ou quatre espèces de verre, que l'on peut distinguer par la couleur que présentent les tubes quand on les regarde par la tranche :

Le *verre blanc ordinaire*, ou verre à la soude et à la chaux, est nettement vert.

Le *verre de Bohême*, ou verre à la potasse et à la chaux, apparaît à peine coloré. Il est peu fusible, aussi est-il en général assez peu homogène et l'on voit souvent comme des grumeaux blancs dans l'épaisseur des tubes en verre de Bohême. Pour travailler ce verre on doit employer une flamme aussi chaude que possible et très oxydante, si l'on ne veut pas le voir se dévitrifier.

Le *cristal*, ou verre à la potasse et au plomb, fournit des tubes qui, vus par la tranche, paraissent jaunes. Il est très fusible et se travaille facilement *dans une flamme oxydante* ; le tube de cristal doit être placé à l'extrémité de la flamme, là où l'air est en plus grand excès. — Dans une flamme blanche, ou bien dans la partie inférieure d'une bonne flamme, c'est-à-dire dans une atmosphère réductrice, le silicate de plomb serait réduit et le cristal noircirait. Si cette coloration est très légère, elle disparaîtra dans une flamme oxydante.

Le *verre spécial*, dit *verre allemand*, est *rose* quand on regarde le tube par la tranche. Ce verre est très fusible, il ne se dévitrifie pas et peut se souder au cristal et à presque tous les autres verres. Aussi, si l'on a à réunir par une soudure deux tubes de verre de provenance inconnue, il sera prudent de passer par l'intermédiaire d'un tube de *verre allemand* (14, 45, 207).

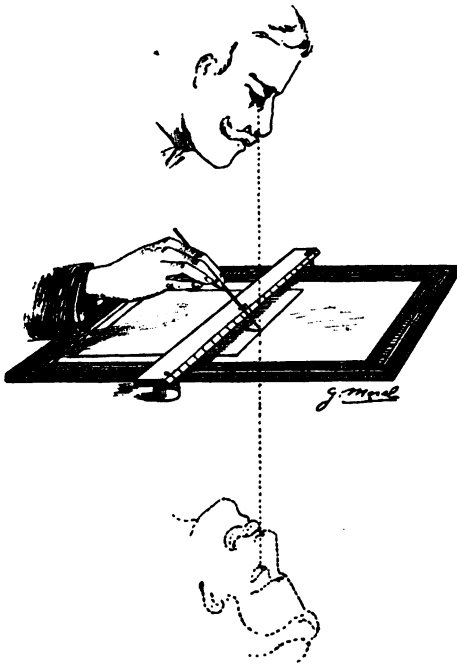


CHAPITRE II.

GÉOMÉTRIE. MÉCANIQUE.

ERREURS ACCIDENTELLES ET SYSTÉMATIQUES.

1. **Erreur de collimation.** — Soutenir un double décimètre par ses deux bouts à quelques centimètres de la table, au-dessus



d'une feuille de papier, marquer sur le papier des points qui paraissent être bien exactement en dessous des centimètres N et $N + 10$; répéter un grand nombre de fois cet essai et mesurer

ensuite les distances réelles. Les écarts sont dus à l'erreur de *collimation*. On s'affranchira de cette erreur en conservant toujours le regard normal à un miroir plan que l'on placera sur la table et que l'on couvrira à moitié avec la feuille de papier.

2. Appréciation des masses. — *Par les poids.* — Alourdir un verre en y versant de l'eau, ou de la grenaille de plomb, et le soulever de temps en temps jusqu'à ce qu'on juge qu'il faut faire des efforts égaux pour soulever ce verre ou un *poids* de 500^g. Peser ensuite le verre, et répéter plusieurs fois cet essai. L'erreur sur les poids est-elle toujours de même signe?

Constater que les écarts sont beaucoup diminués quand on fait les expériences dans des conditions identiques, en plaçant, par exemple, les corps essayés dans un même vase, ou en les suspendant à une même tige que l'on tient à la main.

Par les volumes. — Prendre environ 50^g d'un corps pulvérent (sable tamisé, bicarbonate de soude, etc.), le partager à vue d'œil en deux, trois, quatre, etc. parties égales. Faire à vue d'œil quelques paquets de 1^g. Peser ensuite les différentes parties. Quelle est la précision obtenue?

3. Appréciation des longueurs. — Essayer de reproduire sur le papier une longueur horizontale, verticale ou oblique de 10^{cm}, en regardant un double décimètre placé à quelque distance. Répéter plusieurs fois l'expérience sur des feuilles de papier différentes. — Tracer de même, sur le sol et sur le mur, des longueurs horizontales, verticales ou obliques, paraissant valoir un mètre (1). Y a-t-il des erreurs systématiques?

— Marquer sur le papier des points paraissant être sur une ligne droite horizontale, verticale ou oblique. Les erreurs sont-elles en relation avec la direction de la droite?

LOIS DES GRANDS NOMBRES.

4. Probabilités au jeu de dés. — Agiter un dé dans le cornet et le jeter sur la table. Après une centaine d'épreuves sem-

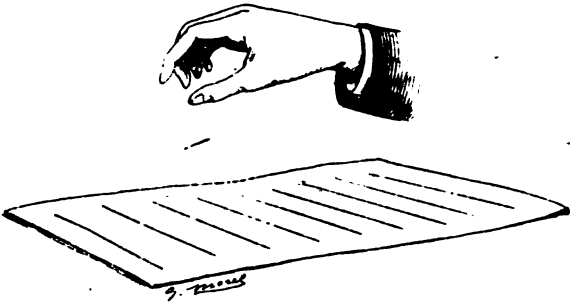
(1) Pour les mesures de longueur grossières, il est bon de s'habituer à reconnaître des longueurs de 1^m ou de 20^{cm} par comparaison avec celles de la main ouverte ou du bras étendu. — On s'exercera utilement aussi à reconnaître la cadence de la seconde, ou d'une fraction de seconde (tic-tac de la montre ou du réveil-matin), comme, encore, à évaluer des angles sans instrument de mesure.

blables, ayant noté combien de fois chaque chiffre est apparu, on constate l'égalité approximative des nombres trouvés.

Répéter la même expérience avec deux dés. Après au moins 200 épreuves, constater que les nombres d'apparitions des coups 2, 3, 4, ..., 12, sont entre eux sensiblement comme les nombres 1, 2, 3, 4, 5, 6, 5, 4, 3, 2, 1, qui en représentent les *probabilités mathématiques a priori*.

On n'obtient des résultats conformes aux prévisions mathématiques que si les dés sont bien symétriques, ce qui est très rare.

5. Jeu de l'aiguille. — Couper un morceau d'aiguille bien cylindrique ($l = 2^{\text{cm}}$). Sur une grande feuille de papier, tracer.



d'autre part, une série de droites, parallèles et équidistantes, de manière que la distance des droites successives soit double de la longueur de l'aiguille.

Jeter l'aiguille au hasard sur le papier, un grand nombre de fois, en mettant quelques feuilles de buvard sous la feuille de papier pour éviter que l'aiguille ne rebondisse trop loin. Compter d'une part le nombre total des épreuves, et, d'autre part, le nombre des cas où l'aiguille se place en travers d'un trait. Former de temps en temps le rapport de ces nombres; il doit tendre vers le nombre $\pi = 3,14$.

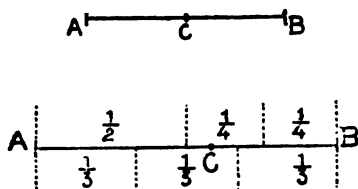
6. Répartition des erreurs accidentelles. — Tracer sur une feuille de papier des circonférences concentriques de rayons croissant par demi-centimètres jusqu'à environ 10^{cm} . D'une hauteur de quelques décimètres, laisser tomber un crayon, la pointe en bas, en s'efforçant d'atteindre le centre et répéter au moins 200 fois l'expérience.

Compter le nombre de points qui se trouvent dans les couronnes annulaires successives et construire la courbe de ces nombres de

points en fonction du rayon moyen de chaque couronne annulaire. Construire également la courbe donnant les *logarithmes* ⁽¹⁾ des nombres de points en fonction des *carrés* des rayons correspondants; constater que cette dernière courbe est grossièrement rectiligne, et profiter de cette remarque pour représenter approximativement, par une formule simple, la loi de répartition des erreurs accidentelles (87).

MESURER LA LONGUEUR D'UNE LIGNE DROITE.

7. Apprécier le rapport de deux longueurs. — Tracer à



main levée des droites horizontales et verticales AB de diverses longueurs, comprises entre 2^{cm} et 20^{cm}; marquer à vue d'œil un point C partageant AB en deux parties égales; mesurer ensuite AC et CB avec le double décimètre à moins d'un demi-milli-

mètre près. Y a-t-il une erreur systématique sur la position du point C?

On partagera, de même à vue d'œil, une droite en trois ou quatre parties égales.

— Faire une marque quelconque C sur une droite horizontale ou verticale AB et apprécier à vue d'œil combien la longueur AC vaut de dixièmes de AB. On facilitera cette appréciation en comparant par la pensée AC à la moitié, au tiers ou au quart de AB. On mesurera ensuite AC et AB pour se rendre compte de la précision obtenue. Pour quelles positions de C l'estimation du rapport $\frac{AC}{AB}$ est-elle la plus précise? Arrive-t-on à estimer le vingtième de la longueur AB?

8. Contrôles. — Mesurer une longueur d'une vingtaine de centimètres avec une règle divisée en centimètres, en appréciant les demi-millimètres, et répéter plusieurs fois l'expérience en plaçant la règle de manière que l'extrémité gauche de cette longueur occupe

(1) On trouve dans le commerce du papier quadrillé suivant les *logarithmes* des nombres entiers.

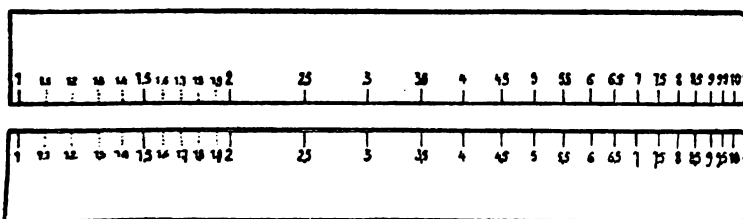
diverses positions dans le centimètre : on devra trouver des résultats identiques. Pour éviter l'auto-suggestion qui ferait toujours trouver le même nombre, on mesurera successivement plusieurs longueurs dans un ordre quelconque en notant toutes les lectures au fur et à mesure qu'elles se présenteront et l'on fera ensuite les soustractions des nombres correspondants.

— Marquer finement une dizaine de points sur une droite ; mesurer leurs intervalles successifs avec le double décimètre, en appréciant les dixièmes de millimètre ; faire la somme de ces mesures et la comparer à la mesure directe de la longueur totale.

— Vérifier les théorèmes de géométrie sur la longueur des côtés d'un triangle, sur les médianes, etc., en faisant une épure sur laquelle les longueurs seront mesurées en appréciant les dixièmes de millimètre (41).

9. Chercher graphiquement le plus grand commun diviseur de deux grandeurs commensurables. — Tracer deux droites représentant à une certaine échelle les deux grandeurs données qui seront, par exemple, les nombres 1099 et 785 (on appréciera les dixièmes de millimètre). Diviser la plus grande par la plus petite en portant celle-ci autant de fois que possible dans la plus grande. Porter le reste autant de fois que possible dans la longueur diviseur... et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'une division se fasse exactement. Mesurer la dernière longueur (en appréciant les dixièmes de millimètre). Constaté ensuite qu'elle est comprise un nombre entier de fois dans chacune des longueurs données (109).

10. Construction d'une règle à calculs. — Sur le bord d'une bande de carton ($24^{\text{cm}} \times 3^{\text{cm}}$) et à partir d'un trait origine, porter successivement des longueurs de 0^{cm} , 41 , 0^{cm} , 79 , ..., 10^{cm} ,



représentant les logarithmes décimaux de 1, 1 ; 1, 2 ; ..., 1, 9 ; 2 ; 2, 5 ; 3 ; ... ; 9 ; 9, 5 et 10. Le bord de la bande de carton devra avoir été coupé très droit pour que l'on puisse apprécier les

dixièmes de millimètre. Les traits correspondant aux dixièmes d'unité seront ensuite placés *au jugé*.

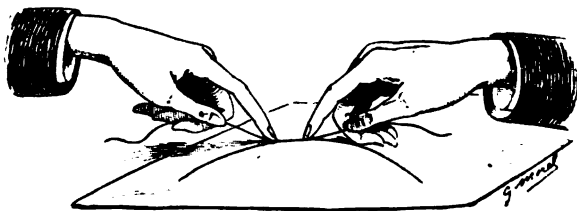
Porter une deuxième fois les mêmes longueurs à la suite des précédentes, en se servant, par exemple, d'un compas dont les pointes auront un écartement de 10^{cm}. — Répéter la même graduation sur le bord inférieur d'une autre bande de carton. — Porter aussi les logarithmes des nombres de 1 à 10 à une échelle double, sur le bord inférieur d'une troisième bande.

On effectuera avec cet appareil des multiplications, des divisions, des règles de trois, des carrés et des racines carrées.

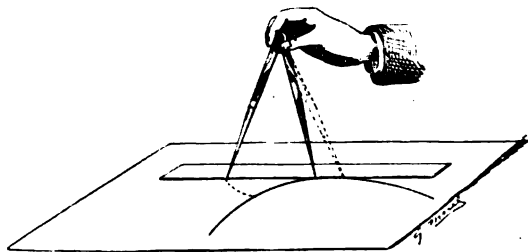
On construirait aussi à très peu de frais de bonnes règles à calcul en collant sur des planchettes de bois des bandes découpées dans le papier à quadrillage logarithmique que l'on trouve dans le commerce (87).

MESURER LA LONGUEUR D'UNE LIGNE COURBE.

11. Appliquer progressivement un fil le long de la courbe en le



guidant avec les ongles, faire sur le fil une marque avec l'ongle à l'endroit où finit la courbe et mesurer la longueur du fil avec le double décimètre.



— On opérera d'une manière analogue avec une bande de papier à bord rectiligne qu'on fera rouler sans glisser sur la courbe en la faisant pivoter de place en place autour d'une pointe d'épingle

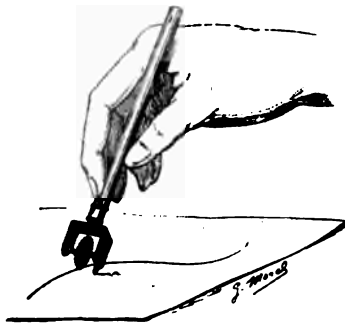
placée au point de contact B. Un autre point A de la bande de papier décrit la *développante* de la courbe étudiée.

— On peut aussi se servir d'un compas dont les pointes sont en A et B et que l'on ouvre davantage en AB' pour ajouter l'élément BB' à la longueur AB déjà mesurée.

Ces mesures se font aisément à $\frac{1}{4}$ de millimètre.

Emploi du curvimètre. — Faire rouler le curvimètre le long de la courbe, puis lire le nombre de tours et la fraction de tour; ou bien faire ensuite rouler le curvimètre à l'envers le long d'une règle à bord gradué, de manière à ramener la roulette à son point de départ.

Exemples. — 1° Tracer au compas trois cercles de quelques centimètres de rayon; mesurer les diamètres avec le double décimètre en appréciant les dixièmes de millimètre; mesurer les circonférences par les procédés précédents, et constater leur proportionnalité aux diamètres. Avec quelle précision le nombre π se trouve-t-il déterminé? (41).



2° Faire une marque sur le bord d'une pièce de monnaie; puis la faire rouler le long d'une droite tracée sur le papier. Marquer deux passages du repère. Relever ensuite la distance de ces deux marques, et la comparer avec la longueur de la circonférence déduite de la mesure du diamètre. La difficulté de cette expérience est de faire rouler la pièce sans la laisser glisser (41, 170).

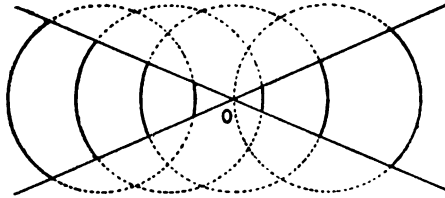
3° Enrouler une bande de papier autour d'un poids de 100^g, marquer avec une pointe d'épingle les extrémités de la circonférence. Dérouler ensuite la bande de papier et mesurer la distance des trous d'épingle avec le double décimètre en appréciant les dixièmes de millimètre. Faire aussi une mesure semblable avec un fil métallique fin.



Y a-t-il lieu de faire une correction pour l'épaisseur du papier ou du fil métallique? On appréciera directe-

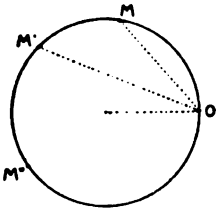
ment l'influence de l'épaisseur du papier en enroulant plusieurs tours l'un sur l'autre et en les marquant tous d'un seul coup d'épingle (174).

12. Mesures d'angles. — Tracer deux droites se coupant en un point O et quatre circonférences, la première de centre O , la



deuxième passant par O , la troisième ayant O à l'extérieur, et la quatrième ayant O à l'intérieur ($R =$ environ 5cm). Mesurer les diamètres de ces circonférences et les longueurs des arcs interceptés par les droites données; en déduire quatre mesures de l'angle. Ces mesures sont-elles concordantes?

— Tracer une circonférence de plusieurs centimètres de rayon; y marquer une origine O et un certain nombre de points $M, M', M'',$ etc., répartis sur toute la circonférence. Mesurer les cordes et les arcs OM, OM', \dots , ainsi que le rayon, puis construire la courbe représentant les cordes en fonction des arcs et la comparer avec la courbe



$$Y = 2R \sin \frac{X}{2R}.$$

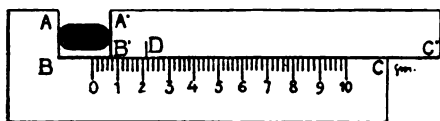
Faire des mesures analogues sur un arc de grand rayon ($l = 10\text{cm}; R = 50\text{cm}$) et comparer avec les courbes limites des petits angles

$$Y = X \quad \text{et} \quad Y = X - \frac{X^3}{24R^2}.$$

MESURES D'ÉPAISSEURS.

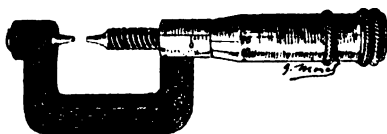
13. Mesures directes. — On se sert du *sphéromètre*, du *palmer* et du *pied à coulisse*. On construira un pied à coulisse

donnant le quart de millimètre avec une feuille de carton mince (20^{cm} , 6^{cm} , $0^{\text{cm}},05$), entaillée en ABC et portant une division en millimètres.



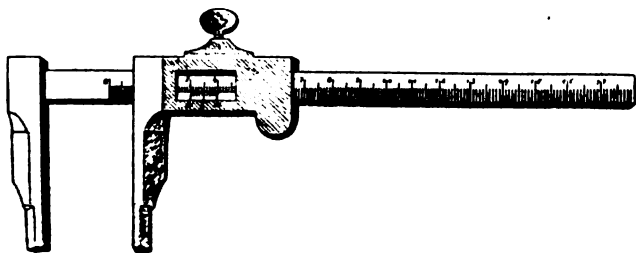
Exemples. — Mesurer l'épaisseur d'une feuille de papier ou d'une feuille de papier d'étain pliée en plusieurs doubles.

— Mesurer les épaisseurs de plusieurs jetons d'os ou de verre, puis l'épaisseur d'une pile de ces jetons et la comparer avec la somme des épaisseurs : y a-t-il une erreur systématique?



— Étudier les variations de l'épaisseur d'une lame de verre à vitre et d'une lame de glace en ses différents points.

— Mesurer au *palmer* l'épaisseur d'un fil métallique



($d = 0^{\text{cm}},05$). Comparer la valeur trouvée avec celle que l'on obtiendrait en mesurant avec le double décimètre la longueur occupée par une centaine de spires de ce fil enroulées côte à côte sur une tige cylindrique (crayon, tube de verre, etc.) (20).

14. Mesures d'épaisseurs avec le niveau. — *Montage.* — Découper une plaque de laiton (2^{cm} ; 2^{cm} ; $0^{\text{cm}},6$), y percer trois trous équidistants ($d = 0^{\text{cm}},5$; $D = 1^{\text{cm}},5$). Souder ensuite trois billes d'acier ($d = 0^{\text{cm}},8$) dans ces trous. Percer un autre trou au

centre de la plaque de laiton et la visser sous le milieu d'un niveau à bulle, de manière qu'une des hauteurs du triangle des billes d'acier soit parallèle à la longueur du niveau.

Expériences. — Placer le niveau sur une règle en fer ($l = 50^{\text{cm}}$), et noter la position de la bulle. Glisser l'objet à mesurer sous le

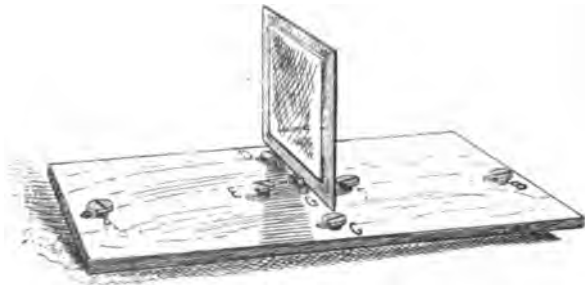


sommet du triangle des billes d'acier, soulever l'extrémité opposée de la règle pour ramener la bulle à sa position primitive, et mesurer le déplacement vertical de cette extrémité avec un double-décimètre, en appréciant les dixièmes de millimètre.

Quelle précision obtient-on sur l'épaisseur à mesurer?

— Pour obtenir le rapport d'amplification on mesurera d'une part la longueur de la règle, et l'on aura d'autre part les dimensions du triangle des billes en déterminant leur diamètre et leurs distances extérieures avec le *palmer*. On pourrait encore déterminer le rapport d'amplification en mesurant avec cet appareil l'épaisseur d'une cale de quelques millimètres, dont on déterminerait aussi l'épaisseur avec le *palmer* (18).

15. Mesures d'épaisseurs avec le levier optique. — *Montage.* — Se procurer des vis à métaux ($l = 0^{\text{cm}},7$; $d = 0^{\text{cm}},3$;

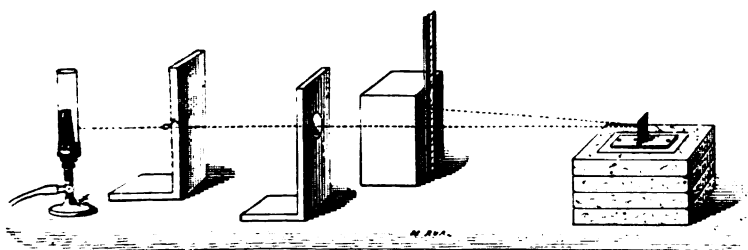


pas = $0^{\text{cm}},05$), et les disposer symétriquement en ABCDEF ($AB = 10^{\text{cm}}$, $CD = 2^{\text{cm}},5$, $EF = 1^{\text{cm}},5$), dans une planchette de

bois ou de métal (12^{cm} ; 4^{cm} ; $0^{\text{cm}},4$). Au centre G de cette planchette, fixer une vis semblable dont la tête est soudée sur le bord d'une plaque de métal (2^{cm} ; 2^{cm} ; $0^{\text{cm}},05$), et fixer un petit miroir plan ($2^{\text{cm}} \times 2^{\text{cm}}$) contre cette plaque.

Fixer sur un support une latte verticale, contre laquelle on aura cloué un mètre ruban *blanc*. Installer, sur une table auxiliaire, une lampe à gaz à incandescence, puis une planchette verticale dans laquelle on a planté un clou horizontalement à la hauteur de la lampe, et enfin une lentille convergente placée à la même hauteur dans une autre planchette.

Expérience. — Poser le *levier* sur un plan de verre et régler



le dispositif optique de manière que l'image de la tige opaque, produite par la lentille, vienne se former sur la règle verticale, après réflexion par le miroir du *levier*.

Noter la position de cette image quand le levier optique repose sur les points des vis A, C, D. Glisser l'objet à mesurer (lame de verre) sous la pointe A. Le levier ayant tourné autour de CD, on mesure le déplacement de l'image en appréciant le demi-millimètre. Opérer de même avec la pointe B, puis mesurer avec le double décimètre la distance AB, en appréciant les dixièmes de millimètre. Quel est le rapport d'amplification, et quelle est la valeur absolue de l'épaisseur mesurée?

Opérer ensuite d'une manière analogue en glissant l'objet sous les points E et F, le levier tournant autour de CD. Quel est le nouveau rapport d'amplification? — Si l'on déduisait la valeur de EF de la valeur trouvée pour le rapport d'amplification, cette mesure indirecte serait-elle plus précise que la mesure directe?

Avec les épaisseurs employées et au degré de précision de la mesure, y a-t-il lieu de faire une correction pour tenir compte de ce que le déplacement de l'image est proportionnel à $\tan 2\alpha$ alors

que l'épaisseur est proportionnelle à $\sin \alpha$? Faut-il tenir compte de ce que le plan réfléchissant peut ne pas passer exactement par l'axe de rotation?

MESURES DE SURFACES.

16. Premier procédé. — Tracer le contour de l'aire à mesurer sur du papier quadrillé et compter les carrés renfermés dans l'aire en appréciant à vue d'œil les fractions de carrés. Mesurer ensuite avec le double décimètre la valeur réelle des divisions en abscisses et en ordonnées en opérant sur environ 10^{cm} .

Deuxième procédé. — Tracer le contour de l'aire à mesurer sur du carton ou sur une feuille de plomb ($e = 0^{\text{cm}}, 05$), et découper cette surface en suivant son contour avec des ciseaux. Découper de même un carré de côté connu, et déterminer le rapport des deux surfaces par des pesées au centigramme (41, 91).

Troisième procédé. — Tracer un certain nombre d'ordonnées équidistantes, mesurer leurs longueurs et calculer la surface.

Exemples. — 1° Tracer des cercles de rayons croissant de centimètre en centimètre, mesurer leurs surfaces et construire la courbe des surfaces en fonction des rayons. Comparer ensuite cette courbe avec la courbe théorique $y = \pi x^2$, et calculer les diverses valeurs du rapport $\frac{y}{x^2}$.

2° Faire sur papier quadrillé la figure de la démonstration classique du *carré de l'hypoténuse*. Relever les aires des différents polygones dont on démontre progressivement l'égalité, relever notamment les surfaces des carrés construits sur les trois côtés. Les nombres trouvés sont-ils exactement d'accord avec la théorie géométrique?

3° *Volume d'une montagne.* — Relever sur la carte la somme des surfaces comprises à l'intérieur des courbes de niveau successives de la montagne et multiplier par l'*équidistance* des lignes de niveau (109).

4° Faire rouler sans glisser un disque circulaire de 5^{cm} à 10^{cm} de diamètre le long d'une règle plate, suivre et tracer avec la pointe d'un crayon la trajectoire d'un point de la circonférence; puis mesurer l'aire de la cycloïde ainsi tracée et la comparer à l'aire du cercle générateur (91).

5° Réduire un dessin quelconque avec un pantographe, et constater que les aires sont proportionnelles aux carrés des dimensions homologues.

MESURES DE VOLUME.

17. Jaugeages par des pesées. — *Contrôle d'un litre du commerce.* — Peser la bouteille vide, puis la bouteille pleine d'eau, à un décigramme près. (Une balance de Roberval *en bon état* peut suffire). En vidant la bouteille, on déterminera aussi la quantité d'eau qui reste adhérente au verre.

Avec quelle précision réalise-t-on l'affleurement de l'eau? Les jaugeages se font-ils au $\frac{1}{2000}$? Y a-t-il lieu de prendre la température de l'eau?

Graduer un vase de verre. — Le long de l'une des génératrices d'une bouteille ou d'une éprouvette, coller une bande de papier blanc. Placer la bouteille sur la balance, tarer. Placer 100^g dans l'autre plateau, rétablir l'équilibre en versant de l'eau dans la bouteille et marquer sur la bande de papier le niveau de la partie inférieure du ménisque. Graduer ainsi de 100^g en 100^g.

Construire une pipette jaugée. — Étirer un tube de verre en forme de pipette ($l = 25\text{cm}$, $d = 0\text{cm},7$) et faire un trait à l'encre à 5^{cm} environ de chacune des extrémités du tube. Remplir le tube par aspiration jusqu'au trait inférieur et rejeter l'eau dans un verre préalablement taré; répéter 10 ou 20 fois ce remplissage et déterminer l'augmentation de poids du verre taré. Opérer de même pour le trait supérieur.

On déduira de ces pesées de combien on devrait déplacer les traits à l'encre pour qu'ils marquent, par exemple, 1^{cm}³ et 5^{cm}³. On placera des traits provisoires aux points indiqués par ce calcul; on vérifiera leur position par le même procédé et l'on tracera les traits définitifs et les chiffres indicatifs avec *de l'encre à écrire sur le verre* (146).

18. Mesures directes de volumes. — Mesurer avec le pied à coulisse l'épaisseur d'un cube de verre (presse-papier), le long de chaque arête. Calculer le volume du cube. Quelle est la précision de cette mesure? Y a-t-il lieu de faire une correction pour les biseaux?

A.

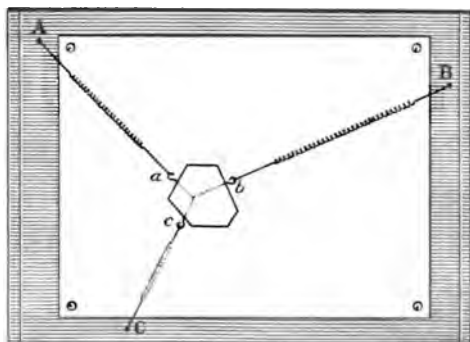
Placer un vase plein d'eau sur la balance (une balance de Roberval *en bon état* peut suffire). Tarer. Immerger le cube suspendu à un fil fin et rétablir l'équilibre. Y a-t-il lieu de faire une correction pour le volume du fil immergé? Faut-il mesurer la température de l'eau? Cette mesure du volume est-elle plus précise que la mesure directe? Répéter l'expérience avec un cube plus petit : le volume trouvé est-il proportionnel au cube de dimensions homologues?

— On pourra aussi mesurer avec le *palmer* les diamètres d'une cinquantaine de billes, calculer leur volume total, et se servir de ces billes pour contrôler une éprouvette graduée (43).

COMPOSITION DES FORCES.

19. Composition des forces concourantes. — En trois points quelconques A, B, C d'une planche à dessin portant une feuille de papier, et placée horizontalement, visser trois pitons A, B, C; en fixer trois autres *a*, *b*, *c* sur la tranche d'une planchette de forme quelconque ($e = 1^{\text{cm}}$, $d = 5^{\text{cm}}$).

Tendre trois ressorts d'acier (100 spires, $D = 1^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 1$) d'une façon quelconque en les attachant par des fils aux cro-



chets A, B, C, *a*, *b*, *c*. Placer trois billes d'acier sous la planchette pour réduire les frottements.

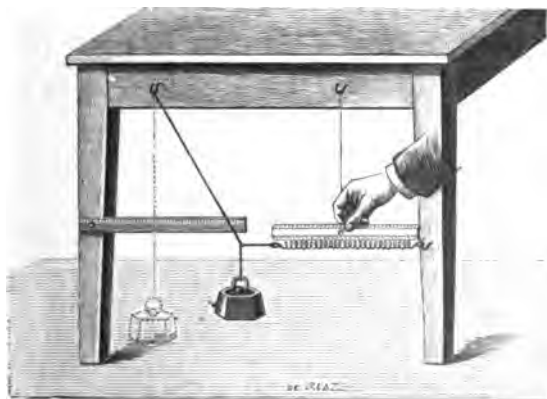
Repérer sur le papier la projection des droites *aA*, *bB*, *cC*, en s'aidant d'une équerre placée perpendiculairement au fil; et mesurer avec le double décimètre la longueur de chaque ressort entre la première et la dernière spire, le long d'une génératrice que l'on aura marquée avec de l'encre ou du vernis.

Détacher ensuite les ressorts et tracer les droites Aa , Bb , Cc : ces droites sont-elles concourantes? — Porter sur chacune d'elles une longueur proportionnelle à la tension du ressort, déduite de son étalonnement : l'un quelconque de ces vecteurs est-il égal et opposé à la diagonale du parallélogramme construit sur les deux autres? — D'un point quelconque abaisser des perpendiculaires sur les trois vecteurs et mesurer ces longueurs : le théorème des moments se vérifie-t-il?

Égalité de l'action et de la réaction. — Supprimer le ressort Cc . Les droites Aa et Bb sont-elles maintenant en prolongement? Les forces indiquées par les allongements des deux ressorts sont-elles égales?

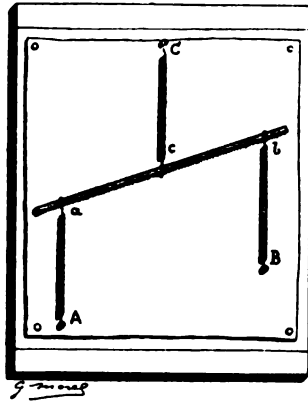
Étalonnement des ressorts. — Accrocher le ressort à un clou fixé au bord de la table; y suspendre des poids en fonte variant de 200^g à 2^{kg} et construire la courbe donnant la tension en fonction de la longueur du ressort. Pour reconnaître s'il y a lieu de faire une correction pour le poids du ressort, on cherchera s'il y a une différence sensible de longueur entre le ressort tenu verticalement par en haut et par en bas (8, 35, 172, 215).

20. Pendule dynamométrique. — Suspendre un poids de 5^{kg} à l'extrémité d'un fil métallique fin ($d = 0^{\text{cm}}, 5$) et tirer horizontalement sur ce fil à l'aide d'un ressort étalonné que l'on pourra



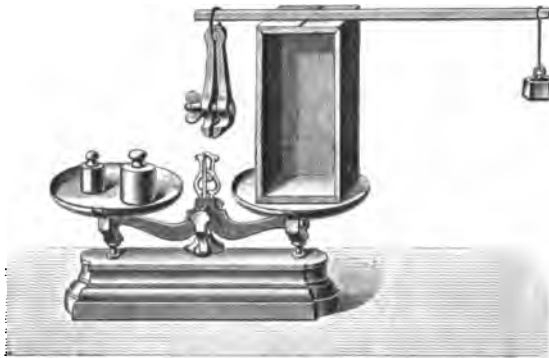
soutenir au moyen d'un fil attaché en son milieu, pour que son poids n'intervienne pas. Mesurer la longueur du ressort et la tangente trigonométrique de la déviation du pendule : la tension du ressort est-elle égale à $P \tan \alpha$?

21. Composition des forces parallèles. — Visser des crochets en trois points quelconques A, B, C d'une planche à dessin, puis, à l'aide de fils glissant sur une règle d'écolier acb et passant dans les crochets, tendre trois ressorts d'acier étalonnés en Aa , Bb , Cc (100 spires, $D = 1^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{mm}}, 1$). Faire glisser les fils a et b le long de la règle jusqu'à ce que les lignes Aa et Bb soient parallèles au bord de la planche et s'assurer avec une équerre et



une règle divisée que le fil Cc s'est placé de lui-même parallèlement aux deux autres. Mesurer les longueurs des ressorts : la force C est-elle la somme des forces A et B ? Les distances des points a , b , c sont-elles en raison inverse des forces? (35, 73).

22. Cas des forces verticales, emploi de la balance. —



Placer un support (caisse en Lois, $h = 20^{\text{cm}}$) sur une balance de

Roberval, poser sur ce support une aiguille à tricoter et sur celle-ci un levier fait d'une règle d'écolier. Équilibrer un objet quelconque, un étai à main par exemple, par un poids de fonte en suspendant les deux corps à la règle par des fils et équilibrer le tout à l'aide de poids marqués placés dans l'autre plateau de la balance.

Mesurer les bras de levier, peser l'étai et peser aussi le poids en fonte s'il n'est pas neuf : le rapport des poids est-il égal au rapport des bras du levier ? la somme des poids composants est-elle égale au poids résultant mesuré dans la première partie de l'expérience ?

— Conservant le même objet à équilibrer et lui laissant le même bras de levier, on l'équilibrera successivement avec des poids différents placés à des distances convenables et l'on construira la courbe des déplacements du contre-poids en fonction de son poids.

— Appuyer les deux bouts d'une barre de fer sur deux balances de Roberval ; comment son poids se partage-t-il entre les deux balances ? Comment se répartissent les efforts si l'on suspend un poids en fonte en un certain point de la barre ? (170).

23. Déterminer le centre de gravité d'une équerre. — Percer un trou de $0^{\text{cm}}, 1$ ou $0^{\text{cm}}, 2$ près de chaque sommet, soutenir l'équerre par une aiguille à tricoter passant dans l'un des trous, suspendre à cette aiguille un fil à plomb tout près de l'équerre et le repérer sur l'équerre avec la pointe d'un crayon. Ayant répété cette expérience pour les trois sommets, on tracera les droites indiquant les trois positions du fil à plomb. Ces droites sont-elles concourantes ? Passent-elles exactement par le milieu des côtés ? Y a-t-il un écart sensible dû au trou central de l'équerre ?

— Percer un trou très fin au centre de gravité qu'on vient de déterminer. L'équerre se tient-elle en équilibre indifférent sur une aiguille passant par ce point ? (41).

24. Déplacements du centre de gravité. — Superposer deux règles plates, l'une d'elles ayant un bord gradué en milli-



mètres. Déterminer la position du centre de gravité de ce système en cherchant à le faire tenir en équilibre sur une aiguille à tricoter placée à plat sous les règles et perpendiculairement à leur direction. Faisant ensuite glisser progressivement la règle supérieure,

on construira la courbe des déplacements du centre de gravité en fonction du déplacement relatif des deux régles.

25. Centre de gravité d'un tabouret. Stabilité et instabilité de l'équilibre. — Fixer un piton à mi-hauteur d'un pied et suspendre le tabouret par ce point. Un fil à plomb, attaché à ce même point, indiquera où l'on devra fixer un second piton sur le pied opposé de manière qu'un fil de caoutchouc tendu



entre ces deux points passe par le centre de gravité. En suspendant le tabouret et le fil à plomb par un piton placé à la partie supérieure, le fil à plomb rencontrera le fil de caoutchouc. On nouera un brin de fil en ce point sur le fil de caoutchouc pour matérialiser le centre de gravité.

On constatera ensuite que si l'on suspend le tabouret par un troisième point, le fil à plomb passe toujours par le point marqué.

Essayer de faire tenir le tabouret sur deux pieds ou sur un pied, et déterminer avec le fil à plomb la position relative des appuis et du centre de gravité quand le tabouret bascule d'un côté ou de l'autre.

— Faire reposer un objet en équilibre stable sur la pointe d'une aiguille en abaissant le centre de gravité au-dessous du point d'appui au moyen d'une surcharge.



— Couper une balle de plomb en deux. L'une des moitiés se tient en équilibre stable quand elle repose sur la table par son sommet. Dessiner une coupe de la balle de plomb et constater que c'est pour cette position que le centre de gravité est aussi bas que possible. — Expliquer d'après cette expérience le

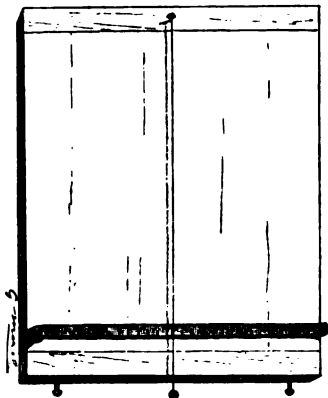
fonctionnement des jouets *le poussah* et *la bouteille inversable*.

26. Niveau et niveau de pente. — Faire un fil à plomb avec de la soie à coudre et un gros plomb de pêche (balle de plomb percée d'un trou) et le suspendre à un clou fixé au milieu et en haut d'une planche à dessin. Clouer un mètre ruban le long du

bord opposé, puis fixer dans l'épaisseur de la planche deux vis à tête ronde débordant de 2^{cm} et sur lesquelles la planche reposera quand on l'aura redressée.

Ayant choisi un trait de la graduation comme repère, on agira sur l'une des vis, de manière à amener le fil devant ce repère. Retournant ensuite le niveau, on agira sur les vis pour ramener le fil à plomb en arrière de la moitié de son déplacement; par un nouveau retournement, on vérifiera que le niveau est bien réglé.

— Utiliser ce niveau pour rendre une table horizontale. — Incliner ensuite fortement la table; marquer une horizontale, une ligne de plus grande pente et mesurer la pente de la table. Construire ensuite la courbe des déplacements du fil à plomb pour les différentes orientations de la ligne d'appui sur le plan incliné; en fonction, par exemple, des déplacements de l'un des appuis qui glissera sur une horizontale quand l'autre appui se déplacera le long d'une ligne de plus grande pente. Comparer cette courbe avec celle que l'on devrait obtenir si l'appareil reposait par des points géométriques sur un plan parfait (18, 41, 110).



ÉTUDE DE LA BALANCE.

27. Balance de démonstration. — *Montage.* — Le fléau est constitué par une règle d'écolier, en bois dur (50^{cm} × 1^{cm}) où trois morceaux d'aiguille à tricoter ($l = 5^{\text{cm}}$, $d = 0^{\text{cm}}$, 2) sont entrés à frottement dur ou scellés à la cire dans des trous percés à mi-épaisseur de la règle. Les crochets portant les plateaux sont en fil d'acier ($d = 0^{\text{cm}}$, 1) courbé à la pince. On constitue les plateaux avec des assiettes en fer-blanc percées près du bord de trois trous équidistants, pour le passage des fils de suspension. Comme



support on prendra un tabouret en bois ($h = 55^{\text{cm}}$) sur lequel deux morceaux de règle de bois dur, placés très près du fléau, serviront de chape pour le roulement de l'axe central.

Pour pouvoir repérer les positions des deux extrémités du fléau, on placera immédiatement derrière celui-ci une règle horizontale aux deux bouts de laquelle on fixera verticalement une règle divisée en millimètres. On déterminera pour chaque expérience le point de cette graduation que l'on vise quand on place l'œil dans le plan de la face supérieure du fléau.

Sensibilité. — Peser les plateaux sur une balance auxiliaire; les mettre en place et les équilibrer à l'aide d'une surcharge convenable. Charger ensuite les deux plateaux de poids croissants; déterminer quelle surcharge il faut ajouter pour produire une déviation du fléau de $0^{\text{cm}}, 2$; et construire la courbe donnant les variations de la sensibilité en fonction de la charge *totale*. — Avec les dimensions indiquées, on pèserait 50^{g} au $\frac{1}{2}$ centigramme et 500^{g} au $\frac{1}{2}$ décigramme.

Les variations de sensibilité observées concordent-elles numériquement avec celles qui résultent de la flexion du fléau?

Parallélisme des couteaux. — Établir l'équilibre pour une charge de 100^{g} . Déplacer le crochet soutenant l'un des plateaux en le faisant glisser à fond de course le long de la tige d'acier qui le porte. Rétablir alors l'équilibre. La charge se trouvant ainsi portée par le milieu puis par l'extrémité du couteau, on pourra déduire de cette expérience l'erreur d'orientation du couteau (38).

Rapport des bras du fléau. — Mettre dans les deux plateaux des masses M, M_2 nominalement égales et établir l'équilibre à l'aide d'une surcharge convenable m_1 . Permuter ensuite M_1 et M_2 et rétablir l'équilibre à l'aide d'une nouvelle surcharge m_2 .

Déduire de ces mesures le rapport des bras de levier et la différence des masses M (38).

Principe des amortisseurs à air. — Percer trois trous équidistants et près des bords dans le couvercle d'une boîte en fer-blanc cylindrique ($V = 1^{\text{l}}$). Cette boîte, mise à la place d'un des plateaux, sera suspendue bien verticalement par des fils passant dans les trous du couvercle. Une autre boîte, un peu plus grande, sera placée de manière que la première y entre presque complètement et s'y déplace sans la toucher pendant l'oscillation du fléau.

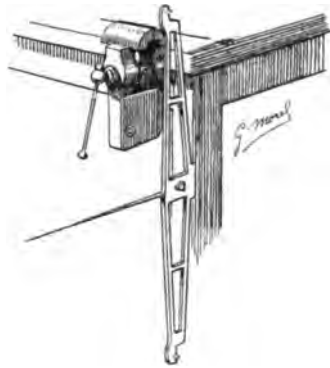
La balance ainsi modifiée atteint-elle plus rapidement sa position d'équilibre? La sensibilité est-elle modifiée?

28. Construire une balance sans plateaux pour peser de petits objets à un demi-milligramme près. — Le fléau est une règle plate que l'on gradue en centimètres. Le couteau est une aiguille à tricoter qui est fixée sur la règle avec de la cire à cache-



ter, et qui repose sur une plaque métallique recourbée dont les bords ont été dressés à la lime et polis au papier d'émeri fin (171).

29. Étude d'une balance de laboratoire. — Après avoir contrôlé la fidélité du retour au zéro, on s'assurera que pour une charge donnée la sensibilité a une valeur déterminée, c'est-à-dire que la déviation du fléau est proportionnelle à la surcharge, puis on étudiera les variations de la sensibilité en fonction de la charge.



Laissant ensuite la charge constante, on modifiera la sensibilité en déplaçant le centre de gravité; cela changera la durée des oscillations de la balance, et l'on verra si la sensibilité augmente proportionnellement au carré de la période d'oscillation.

On déterminera le rapport des bras du fléau comme nous l'avons dit précédemment (II, 27).

On comparera enfin la sensibilité réelle de la balance avec celle que donnerait la formule classique. Pour avoir la distance du centre de gravité à l'axe, il suffira de mesurer d'une part la durée d'oscillation du fléau de la balance, et de déterminer d'autre part la période des oscillations qu'exécute ce fléau quand on le suspend par une de ses extrémités à une aiguille à tricoter parallèle aux couteaux (38).

30. Étalonnage d'une série de masses graduées. — Comparer d'abord deux masses graduées nominalement égales, de 10⁵ par exemple, en se servant d'une balance de laboratoire

pouvant porter 200^g. On admettra sans inconvénient, dans cette expérience, l'exactitude des poids divisionnaires (II, 51).

Vérifier ensuite les autres masses en comparant successivement chacune d'elles à la somme des masses précédemment étalonnées, ce qui nécessite, bien entendu, l'emploi d'une masse supplémentaire de 10^g ou de 20^g. On construira la table des corrections, telles que les donnent les mesures, c'est-à-dire celles que l'on obtiendrait en admettant l'exactitude de la masse la plus faible; puis on rectifiera ces corrections en admettant l'exactitude de la masse la plus forte, qui a plus de chances d'être en bon état de conservation.

On pourra constater à ce propos combien les vieux *poids* sont parfois grossièrement inexacts.

Peser avec des billes. — Reconnaître avec quelle précision l'égalité de masse est réalisée pour les objets que l'industrie fournit par très grandes quantités : pièces de monnaie neuves, billes d'acier, clous, vis, etc., etc. — Faire une pesée en remplaçant les masses graduées par des billes d'acier ($d = 0^{\text{cm}}, 6$). On comptera ces billes en les partageant par moitiés à l'aide de la balance, puis encore par moitiés et ainsi de suite jusqu'à ce que le compte en soit facile à faire.

Construction de masses divisionnaires. — Prendre du fil de cuivre ($d = 0^{\text{cm}}, 05$) et déterminer par tâtonnements la longueur qu'il faut en prendre pour avoir un nombre entier de grammes. Couper ensuite les longueurs correspondant aux divisions du gramme.

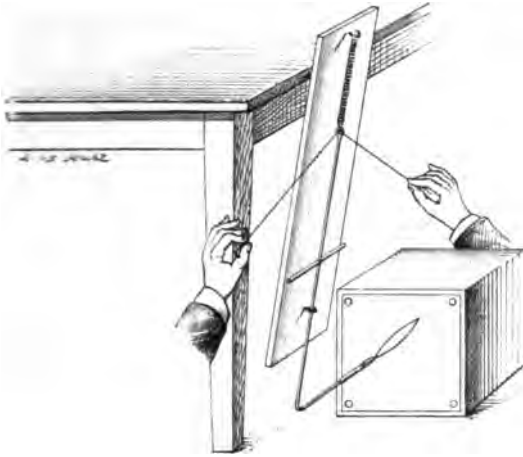
Pour les masses divisionnaires les plus faibles on prendra du fil d'aluminium (109).

INSCRIPTION D'UN TRAVAIL MÉCANIQUE.

31. Montage. — Percer un trou de $0^{\text{cm}}, 2$ ou $0^{\text{cm}}, 3$ à l'un des bouts d'une tige de fer ($l = 65^{\text{cm}}, d = 0^{\text{cm}}, 5$). Courber au feu l'autre extrémité parallèlement à l'axe du trou sur une longueur d'environ 5^{cm} ou 6^{cm} . Souder sous cette tringle, vers son milieu, un morceau de la même tige ($l = 15^{\text{cm}}$), placée parallèlement à la partie recourbée.

Couper et raboter une planche ($65^{\text{cm}} \times 15^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}, 8$) et fixer devant, dans le sens de la longueur, deux petits pitons qui formeront une glissière; après avoir entré la tringle dans ces pitons, on

les fermera à la pince pour qu'il n'y ait ni jeu ni frottement. Fixer, derrière la planche, deux pitons ouverts, aussi écartés que possible et placés à environ 12^{cm} du haut, suivant une ligne bien perpendiculaire à la longue tringle. Ces pitons s'accrocheront à deux autres semblables que l'on fixera au bord d'une table ($h = 70^{\text{cm}}$) de manière que la planche puisse osciller autour d'un axe horizontal.



On accrochera enfin, derrière la planche et vers le bas, un poids de 1^{kg} .

Travail élastique. — Mettre en place un ressort d'acier (25 spires, $D = 1^{\text{cm}}$, $d = 0^{\text{cm}}, 1$), en l'accrochant à un piton vissé dans le haut de la planche, dans une position telle que le ressort vienne s'attacher à la tringle à environ 3^{cm} au-dessus de l'axe de rotation. Fixer un très petit pinceau, monté sur tube et imbibé d'encre, au bout recourbé de la tringle, et en approcher une feuille de papier quadrillé, fixée sur la face verticale d'un support (caisse en bois, $h = 25^{\text{cm}}$).

Tendre progressivement le ressort en tirant avec les deux mains sur les extrémités d'un fil passé dans le trou de la tringle, en ayant soin de tendre le fil parallèlement au plan de la planche et d'opérer *très lentement* pour éviter les oscillations.

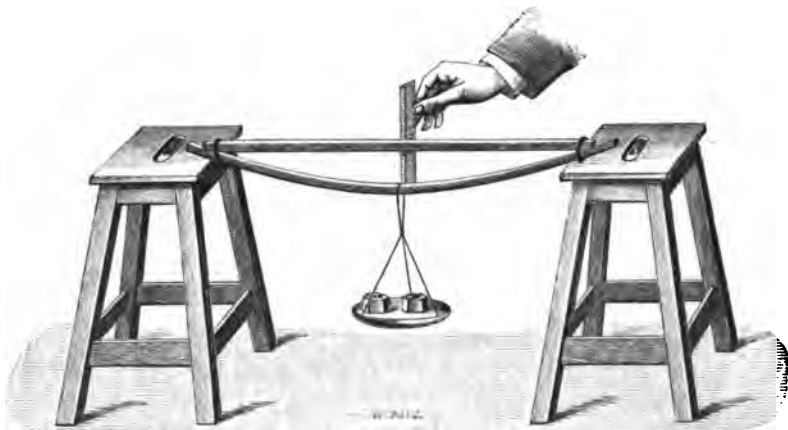
La courbe tracée par le pinceau donne les allongements en fonction des efforts tenseurs et son aire mesure le travail dépensé. — Quand, ensuite, on détend progressivement le ressort, la courbe de retour est-elle identique à la courbe d'aller?

32. Travail de frottement. — Glisser une ou deux feuilles de carton sous la tringle pour établir un frottement notable. Quand on répétera les expériences précédentes, la courbe de retour différera beaucoup de la courbe d'aller et l'on évaluera l'énergie dissipée en mesurant l'aire de la boucle.

33. Travail intérieur. — Remplacer le ressort d'acier par un ressort fait d'un fil de laiton recuit ($l = 40^{\text{cm}}$, $d = 0^{\text{cm}}$, 2) courbé et soudé de manière à former un anneau elliptique ($D = 15^{\text{cm}}$) qui sera lié solidement au piton supérieur et à la tringle par les extrémités du petit diamètre. On inscrira la courbe des déformations cycliques obtenues par des tractions suivies de compressions et l'on constatera qu'il y a de l'énergie dissipée comme s'il existait du frottement.

FLEXION.

34. Flexion d'une baguette. — *Montage.* — Disposer une baguette de sapin ($110^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}$) sur des supports (tabourets



de hêtre, $h = 55^{\text{cm}}$) en la faisant porter de 5^{cm} à chaque bout; suspendre un plateau de balance au milieu et poser une autre baguette ($100^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}$) sur la première en la fixant dans les bouts avec des bracelets de caoutchouc.

Expérience. — Placer dans le plateau de balance des charges croissant de 200^{g} ou de 500^{g} à la fois, jusqu'à 3^{kg} environ. Pour chacune des charges, on mesurera avec le double décimètre la

flèche produite par la flexion de la baguette de sapin ; et l'on pourra apprécier les fractions de millimètre, si l'on a soin de placer l'œil dans le plan tangent à chacune des surfaces visées.

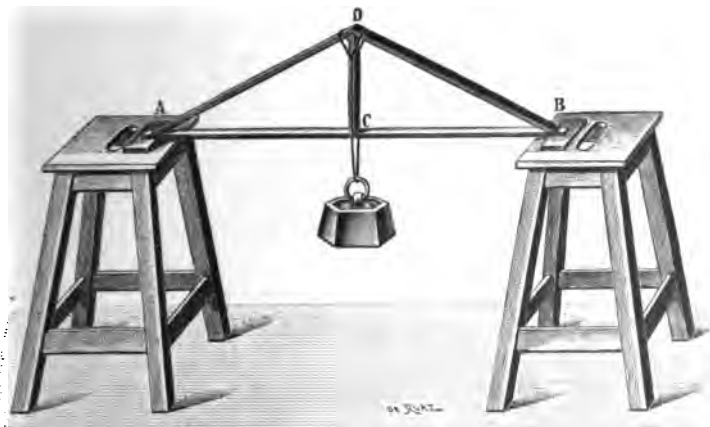
Construire ensuite la courbe donnant les flexions en fonction des charges. Les flexions se produisent-elles instantanément et sont-elles sensiblement proportionnelles aux charges ?

— Pour déterminer la forme que prend la baguette fléchie, on lui fera porter une charge de 3^{kg} , et l'on remplacera la baguette droite de 100^{cm} par une baguette de 50^{cm} placée au-dessus de la partie médiane de la baguette fléchie. Comment la flèche dépend-elle de la longueur de la corde ? — On pourra aussi rapprocher les supports sans changer la charge (3^{kg}). Quelle est la forme de la baguette au delà des supports ? Comment la flèche dépend-elle de l'écartement des supports ? La distance des points d'appui est-elle suffisamment bien définie ?

— Rétablir ensuite les supports à l'écartement de 1^{m} et augmenter les charges jusqu'à 6^{kg} ou 7^{kg} . Constater la déformation permanente. Quelle est la charge de rupture ? Comment la rupture se produit-elle ?

— Répéter la première expérience avec une baguette à section rectangulaire ($110^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}} \times 2^{\text{cm}}$) placée d'abord à plat, puis de champ. Comment la flexion dépend-elle de la largeur et de l'épaisseur de la règle ? (20 ; 68 ; 172).

35. Principe de la construction des fermes. — *Mon-*



tage. — La figure indique les longueurs relatives des différentes pièces ($AB = 100^{\text{cm}}$, $CD = 25^{\text{cm}}$). On les fera en bois de 1^{cm}

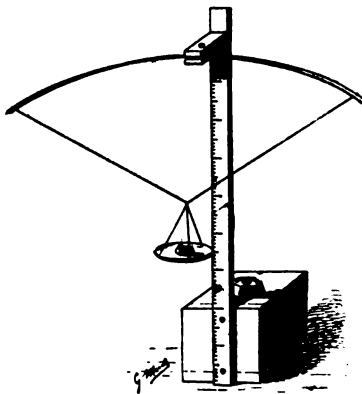
sur 2^{cm} ; et l'on amènera leurs extrémités aux angles voulus en se servant de la *rape à bois*. Ces pièces seront ensuite assemblées avec quelques pointes.

Expérience. — Faire reposer la ferme, par ses deux extrémités, sur des tabourets ($h = 55^{\text{cm}}$). Nouer une corde symétriquement autour du point D, et faire porter à cette corde des charges croissant de 5^{kg} ou de 10^{kg} à la fois.

Comparer la robustesse de cette ferme avec la fragilité de la baguette AB des expériences précédentes.

— On pourra compléter cette étude en essayant de consolider une table hors d'usage et l'on se rendra compte de ce que l'on gagne en rigidité quand on visse, entre les pieds, des lattes horizontales ou des lattes obliques et enfin des lattes croisées et vissées à leur point de croisement.

36. Construire et graduer un dynamomètre. — *Montage.* — Détremper un ressort plat ($100^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}},08$) aux



deux bouts sur environ 1^{cm} de longueur, pour pouvoir y percer des trous ($d = 0^{\text{cm}},1$). Tendre le ressort en un arc dont la flèche aura environ 10^{cm} au moyen d'un fil un peu fort. Avec un morceau de carton mince, faire un plateau léger qu'on suspendra au milieu du fil. Fixer le ressort par son milieu entre deux petits blocs de bois ($10^{\text{cm}} \times 6^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}},8$) vissés au

bout d'un mètre en bois, et visser ce mètre verticalement contre un support (caisse en bois, $h = 20^{\text{cm}}$).

Expérience. — Mettre dans le plateau des masses croissant jusqu'à 500^{g} . Pour chacun d'eux, reporter le déplacement du fil sur le mètre avec une équerre et déterminer les déplacements en appréciant les demi-millimètres. Construire ensuite la courbe donnant les poids en fonction de la position du fil et s'en servir pour peser quelques objets.

On calculera le déplacement du fil pour une surcharge de 10^{g} aux différentes parties de l'échelle (sensibilité absolue), et l'on construira la courbe des sensibilités absolues en fonction de la charge. Pour quelle charge la sensibilité est-elle maxima? Calculer

de même la *sensibilité relative* et construire la courbe donnant cette sensibilité relative sous les différentes charges (171).

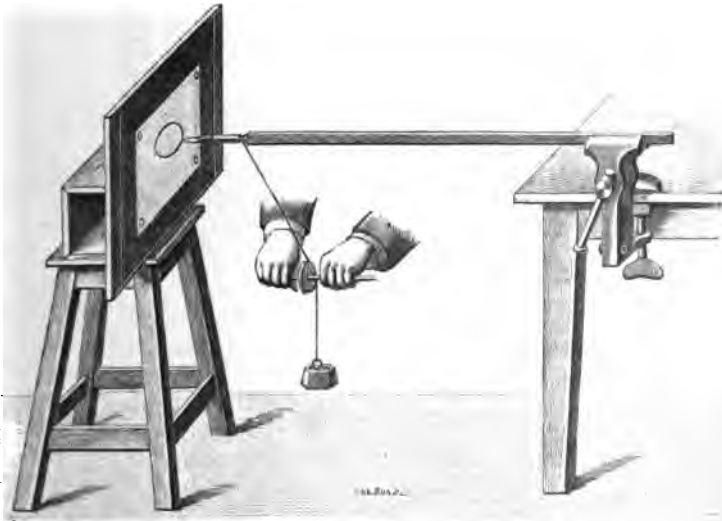
37. Introduction à l'étude de l'élasticité dans les solides anisotropes. — *Montage.* — Ajuster presque sans jeu un crayon tendre (n° 1) dans un tube métallique fermé à un



bout. Placer au fond du tube un ressort, obtenu en enroulant 50^{cm} de corde à piano ($d = 0^{\text{cm}}, 04$) sur une tige de $0^{\text{cm}}, 4$ de diamètre; souder ce crayon enregistreur sur la tête d'une vis ($l = 3^{\text{cm}}, 5$; $d = 0^{\text{cm}}, 5$) et le visser au bout d'une baguette de sapin ($100^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}} \times 2^{\text{m}}$) que l'on fixera dans un étau par l'autre extrémité.

Les flexions de cette baguette seront enregistrées sur une feuille de papier fixée sur une planche à dessin; celle-ci aura, par exemple, été vissée contre un support (caisse en bois, $h = 20^{\text{cm}}$) que l'on placera sur un tabouret, de manière que le plan de la feuille de papier soit normal à la baguette et que le crayon s'y appuie juste assez pour permettre l'enregistrement.

Expérience. — Faire fléchir la baguette à l'aide d'un poids



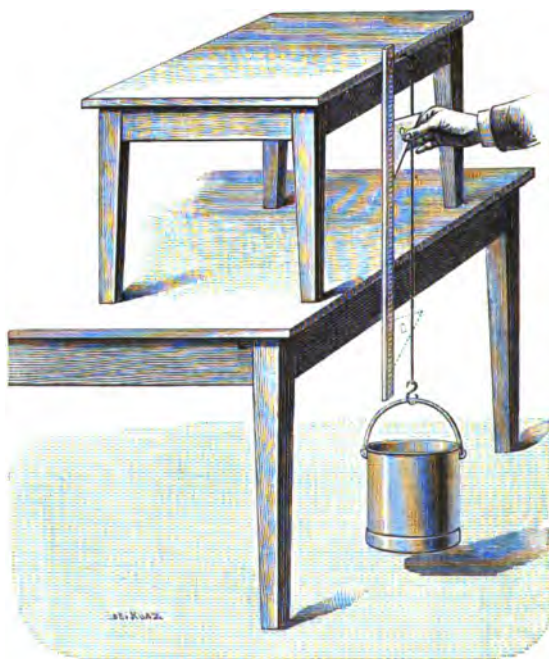
de 500^{g} suspendu à l'extrémité, puis exercer cette même force

de 500^g dans les différentes directions perpendiculaires à la baguette, en déviant le fil à l'aide d'une poulie tenue à la main, que l'on déplacera d'une manière continue pour tracer l'ellipse d'élasticité.

La flexion a-t-elle lieu dans la direction de l'effort? N'y a-t-il pas deux directions principales? (20, 109).

TRACTION.

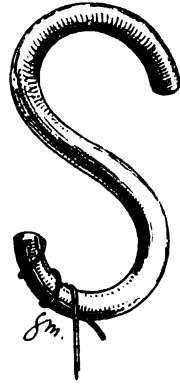
38. Allongement et rupture d'un fil métallique. — *Montage.* — Le fil métallique (cuivre recuit, $d = 0^{\text{cm}}, 05$) d'une



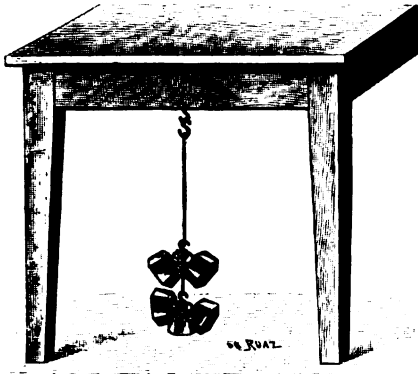
longueur d'environ 100^{cm} sera fixé par enroulement sur des S en laiton de 0^{cm}, 5 de diamètre. On fera passer le fil dans un trou pratiqué dans cet S et on l'enroulera de manière que le fil tendu recouvre l'extrémité non tendue. Accrocher le fil à un support à 150^{cm} du sol et y suspendre un seau vide ($V = 10^l$). Avec du vernis noir ou de l'encre faire deux marques sur le fil à environ 60^{cm} l'une de l'autre.}

Expérience. — Verser progressivement de l'eau dans le seau en se servant de vases gradués (¹). Pour chaque charge, mesurer la distance des marques faites sur le fil et construire la courbe représentant les variations de longueur du fil lorsqu'on fait varier la tension.

Quelle forme particulière présente cette courbe quand, après avoir diminué la charge, on l'augmente de nouveau en dépassant la charge primitive? Quelle est la charge de rupture? Quel est l'allongement total du fil? Le fil cassé s'allonge-t-il encore à la traction? Recuire le fil au rouge sombre dans une flamme réductrice, ou bien au moyen d'un courant électrique : le fil recuit est-il encore cassant? (18, 109).



39. Rupture d'un fil d'acier. — On suspendra à une corde à piano ($d = 0^{\text{cm}}, 04$) des poids (en fonte) croissant à chaque fois d'abord de 10^{kg} , puis de 5^{kg} ; et enfin de 1^{kg} , quand on sera près de



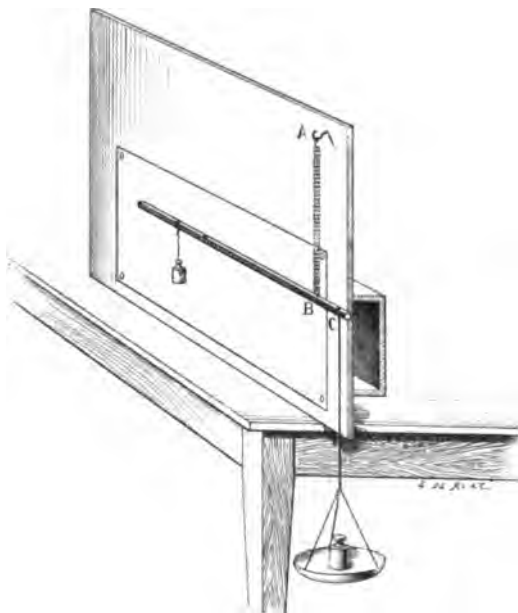
la charge de rupture, connue par un essai préliminaire. Quelle est la charge de rupture? le fil s'allonge-t-il notablement avant la rupture?

— Les expériences précédentes peuvent être réalisées avec un

(¹) La réserve d'eau (ou de sable) pourrait être pesée à chaque instant sur une balance de Roberval. On pourrait aussi organiser un vase à trop plein remplissant le seau à vitesse constante; la mesure des charges serait alors remplacée par la mesure des temps.

peson à ressort tirant horizontalement sur le fil ; un index, glissant à frottement sur la graduation, indique le maximum de traction.

40. Étude de l'allongement d'un ressort en fonction de la charge (méthode graphique). — *Montage.* — Placer une planche à dessin verticalement près du bord de la table, en la vissant sur un support (caisse en bois, $h = 20^{\text{cm}}$). Fixer en A un



bracelet de caoutchouc, ou bien un ressort d'acier (100 spires, $D = 1^{\text{cm}}$, $d = 0^{\text{cm}}, 1$) ; y suspendre une règle d'écolier ($l = 50^{\text{cm}}$), au moyen d'un fil d'acier passant dans un trou B ($d = 0^{\text{cm}}, 2$) percé à 5^{cm} d'une extrémité, et suspendre de même un plateau de balance en C à 1^{cm} de la même extrémité.

Attacher un poids de 100^{g} à un fil qui pourra glisser sur la partie libre de la règle ; et fixer enfin sur la planche une feuille de papier quadrillé, de manière que ses réglures soient verticales et horizontales.

Expérience. — Mettre une charge M quelconque dans le plateau et faire glisser le poids mobile jusqu'à ce que la règle soit parallèle à la réglure ; on évitera les frottements en penchant un peu la planche en avant. S'aidant alors d'une équerre, on mar-

quera au crayon, sur le papier, la projection du point P où est suspendu le poids de 100^g.

Répéter l'expérience pour des charges croissant chaque fois de 100^g et tracer la courbe lieu des points P : les déplacements horizontaux sont proportionnels aux variations des charges et les déplacements verticaux sont égaux aux allongements. On déterminera l'aire de cette courbe et l'on en déduira la valeur du travail mécanique dépensé pendant l'allongement du ressort.

Il sera intéressant de constater que l'on obtient des courbes d'allures toutes différentes en étudiant le *bracelet de caoutchouc* ou le ressort d'acier (68).

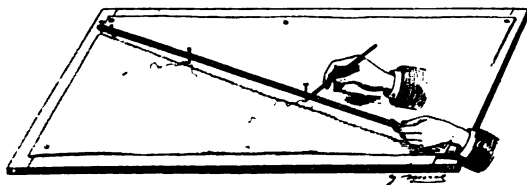
41. Construire et graduer un dynamomètre (1) à ressort. — Charger le dynamomètre de poids croissants, et construire la courbe des allongements en fonction des charges. Y a-t-il un retard au départ? Y a-t-il proportionnalité?

On peut construire un dynamomètre avec un ressort d'acier (100 spires, $D = 1\text{ cm}$, $d = 0\text{ cm}, 1$), ou un bracelet de caoutchouc



($0\text{ cm}, 1$; 1 cm ; $2\text{ l} = 20\text{ cm}$), que l'on fixe sur un triple décimètre au moyen de petits pitons et de crochets en fil d'acier recourbé à la pince, le crochet mobile se prolongeant de manière à courir le long de la graduation (18, 63, 170).

42. Construction d'un pantographe élastique. — Former une boucle de quelques millimètres à l'extrémité d'un fil de caout-



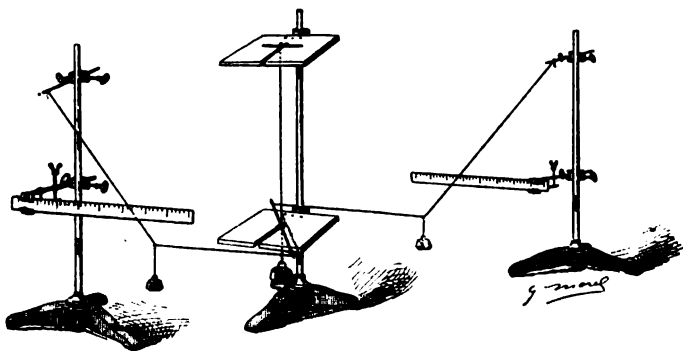
chouc carré ($30\text{ cm} \times 0\text{ cm}, 2$) et piquer dans le fil, perpendiculairement au plan de la boucle, les *pointes* seulement m et M de deux épingles. Au point qui devra être le centre de similitude, on plante

(1) La loi interdit la fabrication et la vente des dynamomètres à ressort pour les usages commerciaux.

un petit clou O sur lequel on passe la boucle du fil. Tendre le fil de caoutchouc, à partir du centre O , de manière que la pointe m suive les contours du dessin à agrandir, et suivre au crayon la pointe M . Relever ensuite des angles et des longueurs homologues sur les deux dessins et constater la similitude des figures (78).

TORSION.

43. Mesure d'un couple de torsion. — *Montage.* — Prendre un fil d'acier bien dressé (corde à piano : $l = 50^{\text{cm}}$, $d = 0^{\text{cm}}, 07$), le souder par ses extrémités dans des trous ($d = 0^{\text{cm}}, 2$), percés au milieu de deux tiges de laiton ($d = 0^{\text{cm}}, 5$, $l = 20^{\text{cm}}$ et 35^{cm}), et percer encore deux petits trous aux extrémités de la grande tige. Se procurer un support portant deux



plateaux horizontaux ($20^{\text{cm}} \times 20^{\text{cm}}$); pratiquer des fentes dans les deux plateaux pour le passage du fil d'acier, et tendre ce fil avec un poids de 1^{kg} . Avec du fil de soie très fin et des *poids* de 50^{g} , faire deux pendules dynamométriques ($l = 50^{\text{cm}}$), qu'on reliera aux extrémités percées de trous de la tige de laiton inférieure ($l = 35^{\text{cm}}$). Des règles divisées en millimètres seront placées horizontalement derrière ces pendules pour mesurer leurs déviations.

Expérience. — Marquer sur le plateau inférieur la position de la tige lorsque le fil est sans torsion, et noter les positions d'équilibre des pendules dynamométriques, puis donner au fil d'acier une torsion de $\frac{1}{2}$ tour en agissant sur sa partie supérieure.

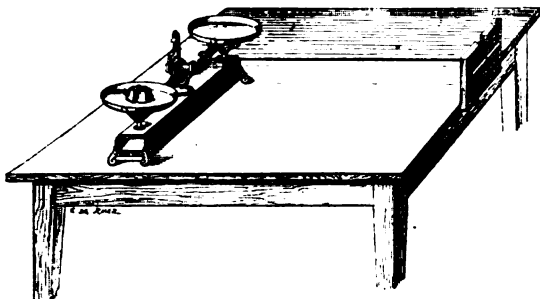
Éloigner alors symétriquement les pendules dynamométriques de manière à ramener la tige inférieure vers sa position d'équilibre. Achèver le réglage de manière que cette tige n'ait subi ni

translation ni rotation et lire les déviations des deux pendules, en ayant soin que les fils de jonction qui transmettent les forces au fil d'acier soient horizontaux et tous deux perpendiculaires à la tige sur laquelle ils agissent.

Les forces forment-elles un couple? Quel est son moment? Est-il proportionnel à l'angle de torsion, même pour une torsion de plusieurs tours? (18, 20, 109, 172).

44. Mesure d'un couple de torsion avec la balance. —

Montage. — Préparer des fils d'acier dressés (corde à piano : $l = 50^{\text{cm}}$ et 100^{cm} , $d = 0^{\text{cm}}, 07$ et $0^{\text{cm}}, 04$), soudés à l'une de leurs



extrémités dans un trou ($d = 0^{\text{cm}}, 2$) percé au milieu d'une tige de laiton ($l = 20^{\text{cm}}$, $d = 0^{\text{cm}}, 5$). Fixer une petite pince à charbon de pile sur le fléau d'une balance près du couteau, et serrer l'extrémité libre du fil dans cette pince.

Passer la tige qui tient l'autre extrémité derrière une planchette fendue fixée au bord de la table et portant un cercle gradué, tel qu'un cadran d'horloge.

Expériences. — En tordant le fil, la balance s'incline, et la surcharge que l'on doit mettre sur la balance pour rétablir l'équilibre est proportionnelle au couple à mesurer.

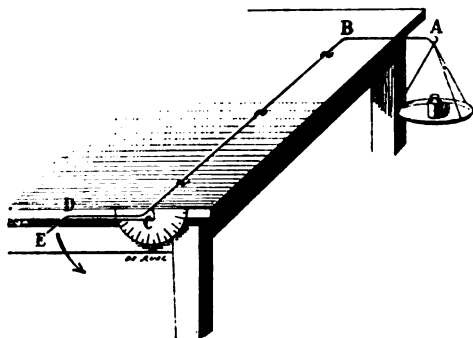
On construira la courbe des couples en fonction des angles de torsion croissants et décroissants, en restant d'abord en dessous de la limite d'élasticité, puis en dépassant cette limite. On changera ensuite le fil étudié pour étudier l'influence de la longueur et du diamètre sur le couple de torsion.

— Chauffer modérément le fil, soit avec un bec Bunsen soit en y faisant passer un courant électrique. La variation de température a-t-elle une influence sensible sur le couple de torsion?

— Chauffer ensuite plus fortement, de manière à détremper et à

recuire l'acier. Son coefficient de torsion est-il changé? La limite d'élasticité reste-t-elle la même? (18, 20).

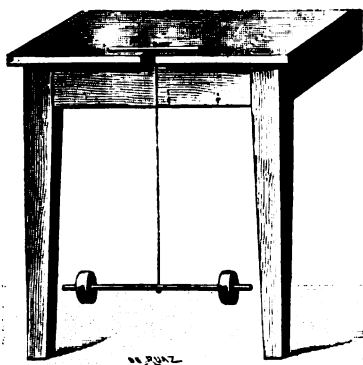
45. Torsion d'une tige. — Prendre une tige de fer ($l = 60\text{cm}$, $d = 0\text{cm}, 2$) et la plier à angles droits suivant la figure *plane* ABCDE. Enfoncer dans la table trois pointes formant cavaliers



pour guider le mouvement de la tige de manière qu'elle ne puisse que tourner autour de BC. Suspendre une charge P au crochet A, et tordre la tige en agissant sur E, comme sur une manivelle, jusqu'à ce que l'extrémité A se soulève.

Les torsions seront mesurées au moyen d'un cercle gradué, cadran d'horloge ou rapporteur, fixé contre le bord antérieur de la table (64).

46. Mesure dynamique d'un couple de torsion. — *Montage.* — Préparer un fil d'acier (corde à piano, $d = 0\text{cm}, 07$,



$l = 50\text{cm}$), fixé à deux tiges de laiton ($d = 0\text{cm}, 5$; $l = 20\text{cm}$ et 35cm). Les tiges sont percées en leurs milieux de petits trous ($d = 0\text{cm}, 2$) dans lesquels on soude les extrémités du fil d'acier. Préparer aussi deux masses métalliques égales pesant environ 200g , et percées d'un trou de $0\text{cm}, 5$, pour qu'elles puissent glisser le long des tiges de laiton.

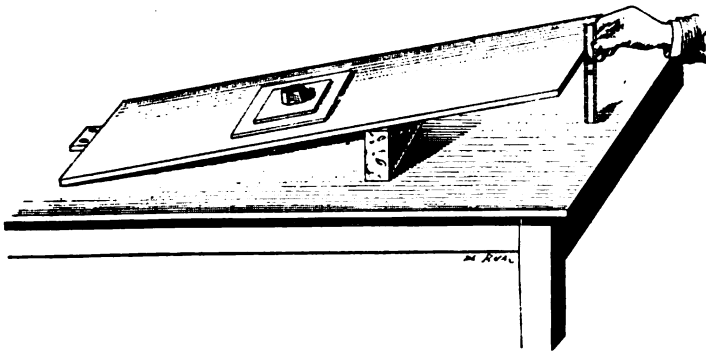
Expériences. — Suspendre le fil d'acier en plaçant la tige de 20cm sur le bord d'une table, au-dessus d'une échancrure qui permettra le passage du fil.

Peser les deux masses mobiles, et les placer sur la tige inférieure symétriquement et près du fil d'acier, mesurer leur distance et déterminer la durée de 50 oscillations.

Écarter ensuite les masses mobiles, et construire la courbe représentant les variations de la période en fonction de la distance de ces masses. On tracera la droite la plus voisine de cette courbe et, du coefficient angulaire de cette droite, on déduira la valeur du couple de torsion du fil (18).

FROTTEMENT DES CORPS SOLIDES.

47. Frottement de glissement. — Placer une planchette de chêne ($20^{\text{cm}} \times 10^{\text{cm}}$) sur une planche plus grande ($100^{\text{cm}}, 22^{\text{cm}}, 1^{\text{cm}}, 8$). Incliner celle-ci jusqu'à ce que le glissement du corps mobile se produise, soit que ce corps parte du repos, soit qu'on le



lance doucement. *La tangente* de l'angle d'inclinaison mesure le coefficient de glissement. Comment le résultat est-il modifié quand on charge la planchette mobile d'un poids de quelques kilogrammes?

On déterminera ainsi les coefficients de frottement, bois sur bois, en fibres parallèles ou perpendiculaires; et le coefficient de frottement de métal sur métal ou sur verre.

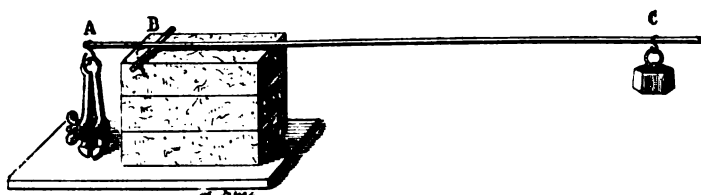
48. Frottement de roulement. — L'un des corps frottants sera en forme de cylindre, et l'on déterminera l'inclinaison limite à partir de laquelle le roulement se produit. Quelle relation y a-t-il entre la tangente de l'inclinaison et le rayon du cylindre?

On comparera aussi les inclinaisons permettant le glissement de deux planches l'une sur l'autre, avec interposition de *rouleaux* de bois dur (crayons), ou avec interposition de sphères (billes de pierre ou d'acier). Comment la tangente de l'inclinaison dépend-elle du rayon des billes ou des cylindres?

49. Frottements composés. — On mesurera l'effort nécessaire pour la traction d'un véhicule sur un sol horizontal en employant comme dynamomètre un tube de caoutchouc un peu fort ($l = 200^{\text{cm}}$, $d = 1^{\text{cm}}$), doublé de manière à faire un ressort de 1^{m} .

L'effort de traction croît-il avec la charge? Croît-il aussi avec la vitesse? Quelle est la puissance nécessaire pour maintenir un régime déterminé?

50. Arrachement des clous et des vis. — *Montage.* — A des distances de 1^{cm} , 10^{cm} et 90^{cm} de l'un des bouts d'une barre



de fer ($l = 101^{\text{cm}}$, $d = 1^{\text{cm}}$, 3), faire trois encoches A, B, C pour fixer la position du rouleau d'appui ($l = 15^{\text{cm}}$, $d = 1^{\text{cm}}$, 3) et des points d'application des forces.

Dans les encoches extrêmes placer des S en fer ou en laiton ($d = 0^{\text{cm}}$, 5), et suspendre un étai à main à la barre de fer au moyen d'une forte ficelle passant plusieurs fois dans l'étai et dans l'S du petit bras de levier.

Expériences. — Installer le levier sur un support en briques placé sur une forte planche ($15^{\text{cm}} \times 40^{\text{cm}} \times 3^{\text{cm}}$). Tarer le levier en déterminant les poids à ajouter à l'étai à main pour équilibrer le poids de la barre de fer, et déterminer ensuite le rapport des bras du fléau en équilibrant un poids de 1^{kg} suspendu à l'extrémité de la barre de fer.

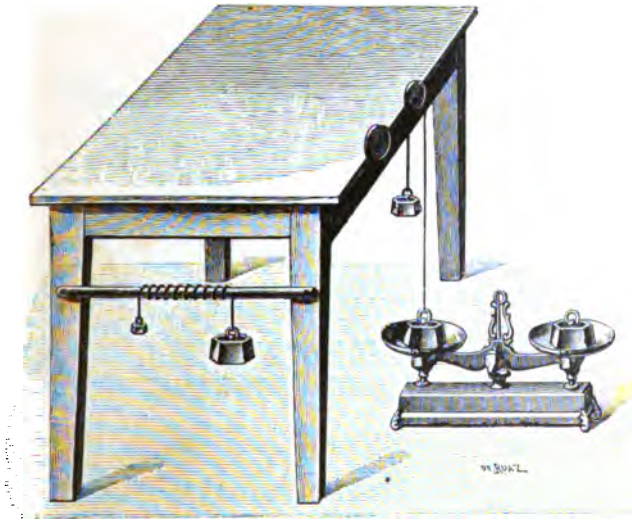
Mesurer le diamètre d'un clou avec un pied à coulisse et marquer à l'encre des longueurs de 1^{cm} , 2^{cm} , ..., à partir de la pointe; enfoncer ce clou dans la planche et mesurer la force d'arrache-

ment en suspendant des poids à l'extrémité du levier. — Répéter l'expérience en enfonçant le clou plus profondément, et opérer avec des clous de différents diamètres. La force d'arrachement est-elle proportionnelle à l'étendue de la surface de contact du clou et de la planche ?

On mesurera aussi la force d'arrachement des mêmes clous dans le sens des fibres du bois en vissant fortement dans la planche un morceau de bois ($8^{\text{cm}} \times 8^{\text{cm}}$), ayant ses fibres verticales.

— On comparera enfin ces efforts d'arrachement avec l'effort nécessaire pour arracher une vis d'un diamètre même beaucoup plus petit (179).

51. Adhérence des cordes. — Fixer verticalement deux poulies de bois ($d = 10^{\text{cm}}$ et 5^{cm}) contre le bord d'une table, placer



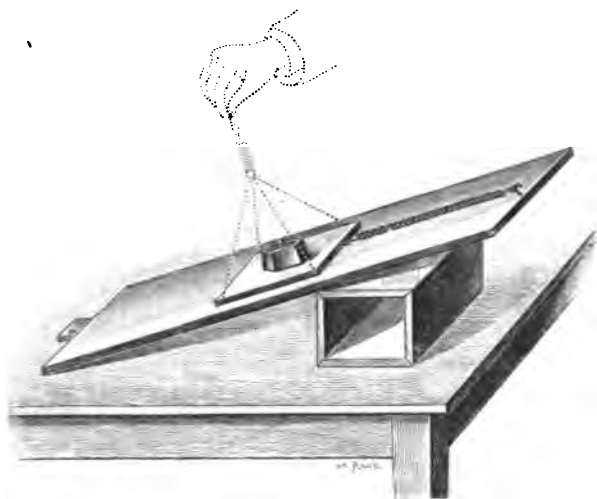
sous ces poulies une balance de Roberval portant dans les deux plateaux des masses égales (5^{kg}), et attacher à l'une d'elles une ficelle passant sur la poulie étudiée et portant une charge p à l'autre extrémité.

Quelle surcharge P doit-on mettre sur la balance pour faire glisser la ficelle qui supporte la charge p ? — Faire croître p depuis 50^{g} jusqu'à 2^{kg} et construire la courbe des variations de $\frac{P}{p}$ en fonction de la charge p .

Voir ensuite comment varie ce rapport $\frac{P}{p}$ quand on répète l'expérience en enroulant la ficelle d'un tour et demi sur la poulie, les deux brins côte à côte — puis quand on change de poulie.

Enrouler la même ficelle en une hélice de 10 spires sur un cylindre de bois, tel qu'un manche à balai, et voir quelle charge considérable il est nécessaire d'employer pour faire glisser la corde, même quand elle n'est tendue que par un poids de 100^g.

52. Conditions d'équilibre sur le plan incliné. — Prendre pour plan incliné une planche de bois ($60^{\text{cm}} \times 22^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}, 8$). Fixer un *poids* de 2^{kg} sur une planchette et mettre celle-ci sur le



plan incliné. Un ressort d'acier étalonné (100 spires, $D = 1^{\text{cm}}$, $d = 0^{\text{cm}}, 1$) est fixé à la planchette et au plan incliné au moyen de pitons; il empêche le glissement.

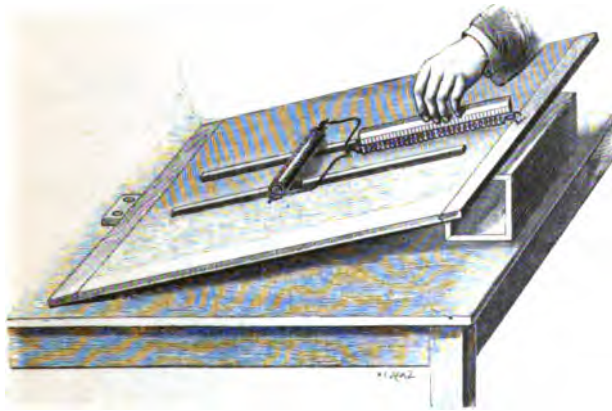
Pour une inclinaison donnée, dont le *sinus* sera mesuré avec un mètre, on déterminera les deux tensions extrêmes du ressort pour lesquelles le mouvement se fait dans un sens ou dans l'autre. Construire ensuite les courbes de ces tensions en fonction de l'inclinaison et les comparer avec les courbes $y = P \sin \alpha \pm fP \cos \alpha$ auxquelles conduit l'hypothèse de l'existence d'un coefficient de frottement défini.

Répéter les expériences en plaçant des billes de 1^{cm} de diamètre

sous la planchette, et comparer les valeurs obtenues avec la courbe $y = P \sin \alpha$ que donnerait la suppression des frottements.

Composante normale de la réaction. — Attacher des fils aux coins de la planchette et les nouer ensemble de manière que la planchette chargée puisse être enlevée horizontalement par ces fils, puis remettre la planchette sur le plan incliné en remplaçant le ressort AB par un fil. Prendre le ressort en main, l'attacher aux fils qu'on vient de fixer à la planchette et tirer dans une direction normale au plan incliné jusqu'à ce que la planchette soit sur le point de se détacher. Mesurer alors la longueur du ressort; en déduire l'effort exercé et le comparer avec la valeur $P \cos \alpha$.

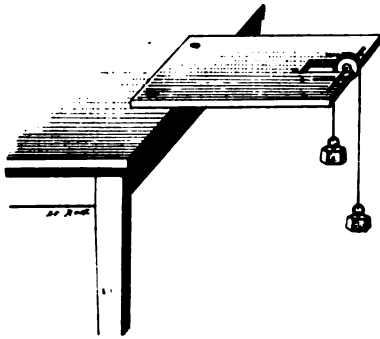
53. On pourra effectuer des mesures analogues en prenant comme plan incliné deux règles carrées placées sur une planche à



dessin et comme corps mobile un *rouleau* fait d'un tube de verre ($l = 12^{\text{cm}}$; $D = 3^{\text{cm}}$) complètement rempli de grenaille de plomb. Les bouchons qui le ferment sont traversés de part en part par une aiguille à tricoter sur laquelle on agit par un double crochet en fil de fer ($d = 0^{\text{cm}}, 3$) plié à la pince (174).

54. **Frottement dans les poulies, rendement.** — *Montage.* — Découper une planche de sapin ($40^{\text{cm}} \times 22^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}, 8$), pratiquer une entaille ($10^{\text{cm}} \times 3^{\text{cm}}$) au milieu d'un des petits côtés et visser cette planche sur le bord de la table, en la faisant déborder de 30^{cm} . Préparer, d'autre part, une poulie en laiton ($d = 4^{\text{cm}}$), montée avec un axe en fer entrant librement dans le trou central.

Préparer une autre poulie en mettant un bouchon métallique dans le trou central, y perçant, bien au centre, un trou d'un diamètre de $0^{\text{cm}},1$ pour faire tourner la poulie autour d'un fil d'acier ($d = 0^{\text{cm}},04$)



tendu entre deux fortes vis ($d = 0^{\text{cm}},7$, $l = 2^{\text{cm}},5$). Une troisième poulie sera montée avec un axe d'acier de $0^{\text{cm}},2$ (aiguille à tricoter) entrant à force ou soudé au centre d'un bouchon métallique fixé dans le trou central. Cette dernière poulie sera utilisée en faisant *rouler* l'axe d'acier sur deux tiges d'acier poli (aiguilles à tricoter) fixées sur le support avec de la cire molle. Préparer enfin de la même manière une poulie plus grande ($d = 0^{\text{cm}},5$).

tricoter) fixées sur le support avec de la cire molle. Préparer enfin de la même manière une poulie plus grande ($d = 0^{\text{cm}},5$).



Expériences. — Avec chacune de ces poulies, l'expérience consistera à suspendre des masses égales (poids en fonte de 50^{g} à 500^{g})

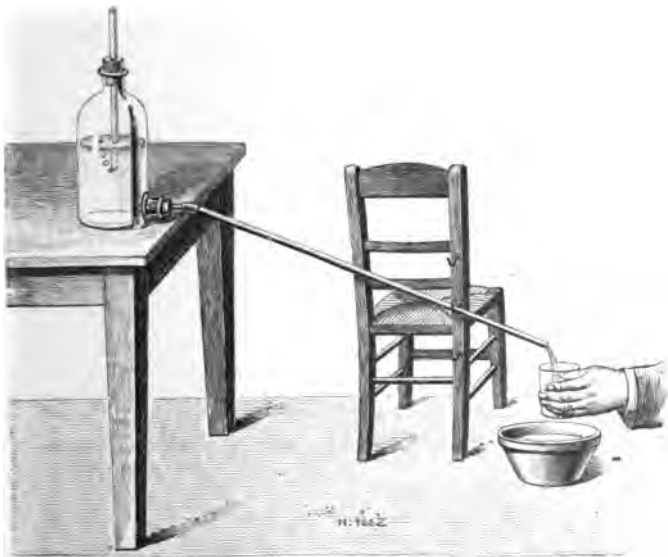
aux extrémités d'un fil de soie très fin passant sur la poulie, à chercher la surcharge nécessaire pour entraîner les différentes masses mobiles, et à calculer le rendement.

Avec un mètre et une montre à seconde on fera les mesures nécessaires pour apprécier l'énergie cinétique en fin de course afin de la retrancher de la perte totale (194).

55. On mesurera d'une manière analogue le rendement d'un appareil industriel de levage. On prendra, par exemple, une *poulie différentielle*, dite à *coquille*, suspendue à une barre de fer scellée dans le mur par les deux bouts; on placera l'opérateur sur une bascule et l'on mesurera sa perte apparente de poids quand il fait l'effort nécessaire pour soulever un tonneau plein d'eau. Ce tonneau sera pesé ensuite sur la bascule.

FROTTEMENT DES FLUIDES.

56. **Liquides.** — *Montage.* — Courber des tubes de verre à angle obtus, à 2^{cm} ou 3^{cm} d'une extrémité ($l = 100^{\text{cm}}$;



$d = 0^{\text{cm}}, 2$ et $0^{\text{cm}}, 4$). Monter un flacon tubulé en bas ($v = 2'$)

en vase de Mariotte et relier le tube d'écoulement ($d = 0^{\text{cm}}, 7$) au tube en expérience par un raccord flexible.

Expériences. — Ajuster le tube de $0^{\text{cm}}, 2$ et l'appuyer sur un support en réglant sa hauteur de manière que l'eau, sur le point de s'écouler, forme un ménisque plan et mesurer alors à 1^{mm} près la hauteur de l'ouverture au-dessus du sol. Abaisser ensuite le tube et mesurer le débit d'eau ainsi que la hauteur au-dessus du sol et répéter cette expérience pour différentes pressions.

Y a-t-il lieu de tenir compte de la contre-pression capillaire dans la formation des gouttes? La précision des mesures est-elle suffisante pour qu'il faille tenir compte de l'énergie emportée par l'eau sous forme de force vive ⁽¹⁾?

On construira la courbe des débits en fonction des pressions. Cette courbe est-elle rectiligne?

Influence de la longueur. — Couper le tube de verre successivement aux longueurs de 50^{cm} , 20^{cm} , 5^{cm} , 1^{cm} ; régler la pression pour avoir toujours le même débit. La perte de charge dans le tube est-elle proportionnelle à la longueur? La correction de force vive devient-elle prépondérante pour les tubes courts?

Influence de la température. — Répéter l'une des expériences en chauffant le tube près du flacon avec un bec Bunsen, de manière que l'eau s'écoule tiède et constater l'augmentation du débit.

Influence du diamètre. — Répéter les expériences avec le tube de 4^{mm} en corrigeant toutes les hauteurs de chute de manière à tenir compte de la force vive. Pour une même hauteur, le débit est-il proportionnel à la quatrième puissance du diamètre?

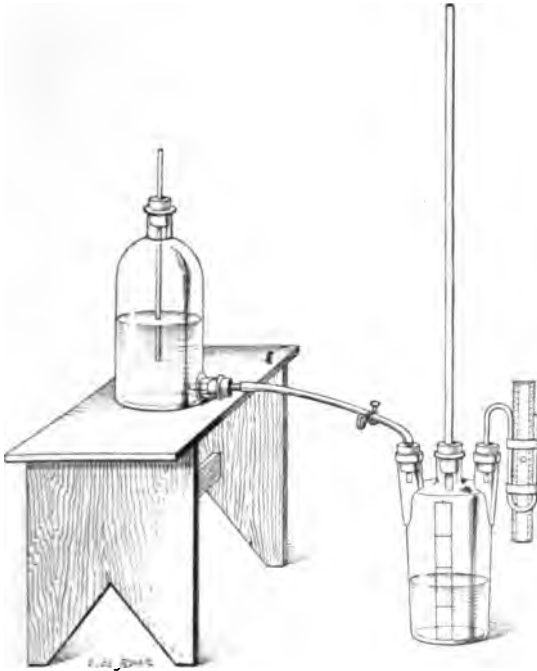
— Le diamètre des tubes sera déterminé avec une précision suffisante en se servant d'un double décimètre et en appréciant les dixièmes de millimètre (202).

57. Frottement d'un gaz. — *Montage.* — Disposer un flacon tubulé en bas ($V = 2^1$) en vase de Mariotte avec des tubes de verre de $0^{\text{cm}}, 7$ de diamètre. Le relier à l'une des tubulures d'un flacon à deux tubulures ($V = 2^1$) par un tube de caoutchouc,

(1) La correction est $\frac{m^2}{\pi^2 r^4 d^3 g}$; on la trouverait deux fois plus faible si l'on admettait que la vitesse du liquide est la même dans toute la section du tube alors qu'elle décroît, au contraire, jusqu'à zéro au voisinage des parois.

(feuille anglaise), fermé par une pince à ressort. L'eau entrera dans ce flacon par un tube de verre étiré ($D = 0^{\text{cm}}, 7$; $d = 0^{\text{cm}}, 4$). Installer sur l'autre tubulure un tube en S formant manomètre à eau ($D = 0^{\text{cm}}, 7$; $3l = 60^{\text{cm}}$), le long duquel on attachera un double décimètre au moyen de bracelets de caoutchouc.

Expériences. — Ayant collé une bande de papier sur le flacon à deux tubulures, on le graduera en quarts de litre par des pesées, et l'on installera un tube de verre ($l = 100^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 2$) dans



le goulot. Les bouchons, de liège ou de caoutchouc, devront être *absolument étanches*.

Faire écouler l'eau à une vitesse telle que la dénivellation du manomètre soit comprise entre $0^{\text{cm}}, 5$ et 20^{cm} ; répéter cette expérience pour diverses vitesses et construire la courbe des débits de l'air, c'est-à-dire des débits de l'eau, en fonction de la pression. Y a-t-il proportionnalité? Y a-t-il lieu de tenir compte de la force vive de l'air?

L'expérience pourra être répétée avec de l'anhydride carbonique. On comparera les valeurs du coefficient de frottement de ces

gaz à celui du coefficient de frottement de l'eau déterminé dans les expériences précédentes.

Influence du diamètre et de la longueur. — Remplacer le tube de $0^{\text{cm}},2$ par un tube de $0^{\text{cm}},1$ et mesurer le nouveau débit. Est-il sensiblement proportionnel à la troisième ou à la quatrième puissance du diamètre? — Couper le tube au quart de sa longueur et mesurer encore le débit. La perte de charge dans le tube est-elle proportionnelle à la longueur?

MOUVEMENTS VARIÉS.

58. Mouvement d'un corps en chute libre. — *Montage.* — Fixer deux pitons au bout d'une planchette de sapin ($25^{\text{cm}} \times 10^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}},8$) et suspendre le pendule ainsi constitué à une tige métallique tenue horizontalement ($l = 20^{\text{cm}}, d = 0^{\text{cm}},5$). Visser aussi un crochet derrière la planchette et vers le bas. — Courber au feu deux tiges de fer ($l = 30^{\text{cm}}, d = 0^{\text{cm}},5$) à angles droits, et monter ces tiges et le pendule sur un support comme l'indique la figure.

Expériences. — Suspendre une balle de plomb trouée (plomb de pêche; $d = 1^{\text{cm}},6$), à un fil tenu à la main et que l'on appuiera sur la tige supérieure. Régler cette tige de manière que la balle de plomb frôle la planche, immobile dans sa position d'équilibre. Attacher ensuite le fil à plomb au crochet vissé derrière la planche en faisant passer ce fil derrière la tige inférieure et par-dessus la tige supérieure. Régler la longueur du fil de manière que la balle de plomb pende à environ 20^{cm} au-dessus du milieu de la planche, et que le bas de la planche soit dévié en arrière de quelques centimètres.

Mesurer à un millimètre près la hauteur du centre de la balle au-dessus de la table d'expériences, puis brûler le fil. La balle tombe, la planche oscille, heurte la balle pendant sa chute, et celle-ci laisse sur la planche une



marque qui fait connaître le point de contact. Si la marque n'est pas assez nette, on mettra une feuille de papier blanc sur la planche, et, si cela ne suffit pas, on recouvrira cette feuille de papier blanc d'une feuille de papier à reproductions avec lequel la moindre pression laisse une trace très nette.

On relèvera la hauteur de cette marque au-dessus de la table et l'on en déduira la hauteur de la chute. Mesurant, d'autre part, la durée de 25 oscillations complètes de la planche, on connaîtra le temps qu'a duré la chute libre, puisque le choc s'est produit après une demi-oscillation simple.

On répétera ensuite les mêmes mesures avec une planche longue de 50^{cm}, afin de vérifier la loi des espaces. — On calculera enfin la valeur moyenne que ces expériences fournissent pour g (165, 174).

59. Étude de quelques mouvements volontaires. — Écarter la planche de sa position d'équilibre en la retenant avec la main gauche, pendant que de la main droite on tient la balle de plomb contre la tige supérieure. Abandonner brusquement les deux objets en ouvrant les mains au même instant et déterminer la position du point où la balle est rencontrée dans sa chute par la planche oscillante — et répéter cette expérience une douzaine de fois :

1° Quels écarts présentent les différentes marques laissées sur le papier et quels sont, par conséquent, *en temps*, les défauts accidentels de simultanéité du mouvement des deux mains?

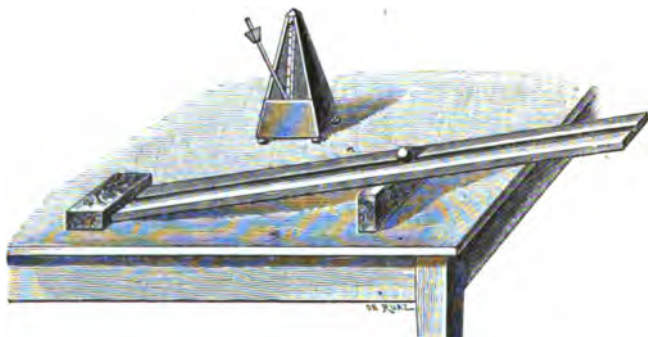
2° La position moyenne des points de rencontre de la planche et de la balle qui tombe est-elle la même que lorsqu'on emploie le procédé automatique, ou bien y a-t-il un retard systématique d'une main sur l'autre?

60. Étude directe de la chute libre et du mouvement retardé. — *Direction de la chute libre.* — Laisser pendre un fil à plomb jusqu'au sol et marquer le point où il touche terre, puis remonter le fil à plomb en conservant bien exactement le même point de suspension. Brûler alors le fil : le corps tombe et vient toucher terre juste au même point que tout à l'heure.

Loi des espaces. — Laisser tomber une bille dans la cage d'un escalier pendant des temps croissant en progression arithmétique, que l'on mesurera au moyen du *tic-tac* d'un métronome ou d'un réveil-matin. La loi des espaces se vérifie-t-elle? Quelle valeur de g peut-on déduire de ces expériences?

Si on laisse tomber la bille d'une hauteur telle qu'elle mette juste une demi-seconde à remonter quand elle rebondit, mettra-t-elle autant de temps à redescendre? (22, 63, 107, 126, 174).

61. Mouvement rectiligne sur le plan incliné. — Constituer un plan incliné avec une planche ($l = 200^{\text{cm}}$, $e = 1^{\text{cm}}$, 8), le long de laquelle on a pratiqué une rainure profonde de quelques millimètres. Les temps seront mesurés par les battements d'un métronome ou d'un réveil-matin, et l'on cherchera à

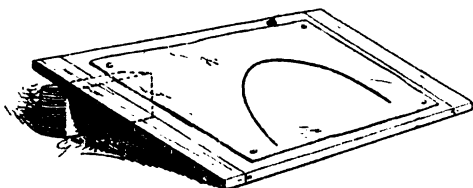


quel endroit de la rainure il faut placer la bille pour qu'en l'abandonnant sans vitesse initiale à l'instant d'un battement, elle arrive en bas juste à la fin de l'intervalle de temps choisi.

Construire la courbe représentative des espaces parcourus en fonction du carré des temps, tracer la droite la plus voisine de cette courbe, et calculer l'accélération moyenne du mouvement. Déterminer l'influence de l'inclinaison sur cette accélération, et comparer les accélérations obtenues sous différentes inclinaisons avec celles que l'on calculerait en admettant, soit que la bille roule sans glisser (petites inclinaisons), soit qu'elle glisse sans rouler (grandes inclinaisons) (103, 107, 111, 138).

62. Mouvement parabolique sur le plan incliné. — Fixer une grande feuille de papier sur une planche à dessin, et poser cette planche sur la table en l'inclinant un peu ($\tan \alpha = \frac{1}{3}$). Laver une petite bille à l'éther, la mouiller d'encre et lancer cette bille dans une direction inclinée, le long de la planche, de manière à lui faire inscrire sur le papier sa trajectoire montante et descendante. — Abandonner aussi la bille sur le papier sans vitesse initiale, pour qu'elle trace la ligne de plus grande pente du plan.

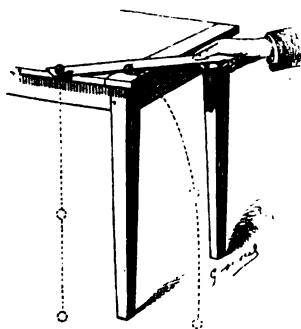
Déterminer sur la courbe le point de contact de la tangente horizontale, et mener la ligne de plus grande pente passant par ce point : la trajectoire est-elle symétrique par rapport à cette



droite? — Mener des ordonnées équidistantes; l'ordonnée est-elle proportionnelle au carré de l'abscisse? — Mener aussi quelques tangentes; leur coefficient angulaire est-il proportionnel à l'abscisse du point de contact?

63. Inscription sur verre enfumé. — Prendre un carreau de verre ($25^{\text{cm}} \times 25^{\text{cm}}$); enfumer une de ses faces en la passant dans la partie supérieure d'une flamme de bougie. Incliner légèrement le plan de verre ($\tan \alpha = \frac{1}{10}$), et inscrire comme précédemment la ligne de plus grande pente, et la trajectoire parabolique d'une bille d'acier lancée obliquement. Le graphique sera fixé, comme un dessin au fusain, dans une solution alcoolique très étendue de gomme laque, et l'étude de la courbe sera faite sur le dessin ainsi fixé.

64. Chute verticale et chute parabolique. — Placer une

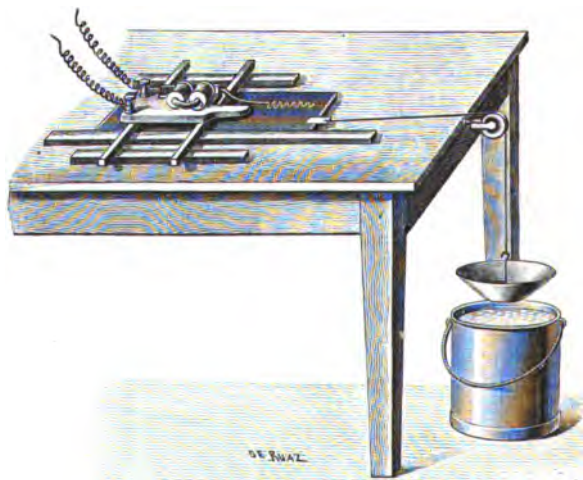


règle sur le bord d'une table, l'extrémité débordant de 3^{cm} . Placer une bille de plomb sur ce bout de règle et mettre une autre bille sur la table à côté de la première. — Faire brusquement glisser la règle : la première bille tombe verticalement, tandis que la seconde,

heurtée par la règle, tombe suivant une parabole. Les deux billes arrivent-elles ensemble sur le sol? (64).

ÉTUDE CHRONOGRAPHIQUE D'UN MOUVEMENT.

65. Chronographe. — *Montage.* — Clouer une règle plate sur la table pour guider le mouvement de la plaque de verre ($30^{\text{cm}} \times 10^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}},2$), sur laquelle se fera l'enregistrement. Visser une poulie de renvoi ($d = 4^{\text{cm}}$), dans le bord de la table, à 5^{cm} environ en avant du prolongement de la règle plate. Fixer sur la plaque de verre avec un peu de cire à cacheter ou d'arcanson un fragment de règle plate ($2^{\text{cm}} \times 3^{\text{cm}}$), percé d'un trou pour attacher le fil. Pour faciliter le glissement, on aura soin de placer le point d'attache au tiers du petit côté de la plaque de verre, vers la règle qui guide le mouvement.



Retirer la caisse, le timbre et le marteau d'une sonnerie électrique, et faire dans sa planchette une échancrure convenable pour permettre le passage de la tige qui portait le marteau, tige que l'on dévissera d'un demi-tour pour la diriger vers le dessous de la planchette (77).

Découper, avec des ciseaux, un style ($2^{\text{cm}},5; 0^{\text{cm}},2; 0^{\text{cm}},015$), fait d'une pellicule de celluloid, d'acier ou de clinquant, et le

fixer à la tige vibrante par une goutte d'arcanson ou par un bout de tube de caoutchouc (diam. intér. = $0^{\text{cm}}, 15$).

Clouer transversalement sous la sonnerie deux règles carrées ($l = 25^{\text{cm}}$) en plaçant leurs milieux à la hauteur de la tige vibrante. Clouer sur la table deux règles semblables, parallèles à la règle plate qui guide le mouvement, de manière que la sonnerie puisse se placer au-dessus de la plaque mobile. On guidera les déplacements de la sonnerie dans le sens perpendiculaire au mouvement de la plaque de verre au moyen de deux clous à crochet plantés dans la table et formant glissière.

Préparer une surface tronconique en zinc de $0^{\text{cm}}, 15$ d'épaisseur ($D = 25^{\text{cm}}$; $d = 6^{\text{cm}}, 5$; $l = 10^{\text{cm}}$). Fixer une tige de métal ($l = 7^{\text{cm}}$) en travers de la petite ouverture, et souder en son milieu une tige verticale ($l = 10^{\text{cm}}$), terminée en crochet et au moyen de laquelle on manœuvrera l'appareil.

Expériences. — Enfumer légèrement la plaque de verre en la passant dans la pointe de la flamme d'une bougie. Régler le style de manière que sa pointe tombe verticalement sur la plaque de verre en fléchissant de $0^{\text{cm}}, 1$. Quand cette plaque de verre se déplace, le style inscrit les vibrations de la sonnerie. Avec une plume auxiliaire tenue à la main à côté du style vibrant, on fera, sur la plaque, des marques supplémentaires en suivant la cadence d'un métronome ou d'un pendule battant la seconde.

On entraînera d'abord la plaque de verre au moyen d'un poids en fonte de 200^{g} , tombant en chute libre dans l'air; puis au moyen de ce même poids tombant dans un seau plein d'eau ($h = 33^{\text{cm}}$, $d = 26^{\text{cm}}$); et l'on répétera cette expérience en laissant tomber le poids de 10^{cm} ou 20^{cm} dans l'air avant qu'il ne pénètre dans l'eau. — On produira enfin le mouvement de la plaque enfumée à l'aide de la charge tronconique tombant dans l'eau.

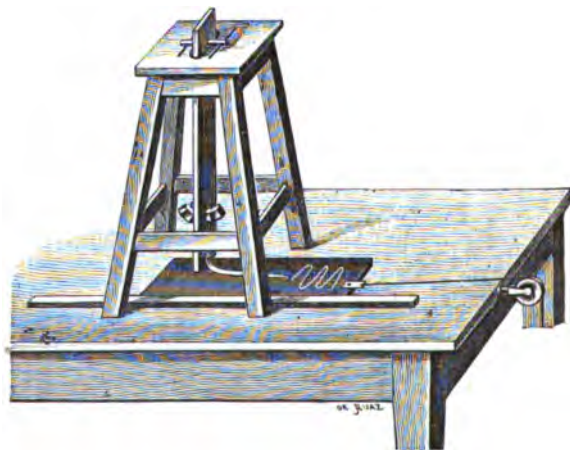
Pour ces expériences successives, on déplacera la sonnerie transversalement de manière à éviter la superposition des tracés.

Fixer les graphiques obtenus avec une solution alcoolique très étendue de gomme laque et relever les distances avec un double décimètre en appréciant les dixièmes de millimètre.

Les mouvements sont-ils uniformément accélérés ou retardés? Y a-t-il des vitesses limites? Obtient-on un mouvement uniforme de la plaque mobile en prenant comme poids moteur le tronc de cône qui descend dans l'eau?

66. Application au mouvement en chute libre. — Il suffira de coucher la table pour que la plaque de verre puisse tomber presque verticalement, et l'on enregistrera le mouvement en chute libre. Pour cette expérience, on augmentera autant que possible l'amplitude des vibrations du style en rapprochant l'électro-aimant de son armature.

67. Application au mouvement oscillatoire amorti. --
Montage. — Constituer un pendule avec une planche (55^{cm} : 8^{cm} ; 1^{cm} , 8) traversée vers le haut par une tige de fer ($d = 0^{\text{cm}}$, 5). Cette tige sera l'axe de rotation et roulera sur deux grosses aiguilles à tricoter placées parallèlement de part et d'autre d'une ouverture ($12^{\text{cm}} \times 4^{\text{cm}}$), pratiquée au milieu du siège d'un tabouret en bois ($h = 55^{\text{cm}}$). — On suspendra des poids en fonte de 1^{kg} devant et derrière la planche, à 10^{cm} du bord inférieur.



Le style ($12^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}}$, 5) sera découpé avec des ciseaux dans une feuille d'acier de 0^{cm} , 01 à 0^{cm} , 02 d'épaisseur; on le clouera sur la planche par une de ses extrémités que l'on aura détrempée sur une longueur de 2^{cm} . Pour que les courbes ne soient pas déformées, on aura soin de placer le style d'une manière *absolument symétrique* par rapport au plan vertical contenant l'axe.

Le dispositif d'enregistrement est le même que pour les expériences précédentes (II, 65).

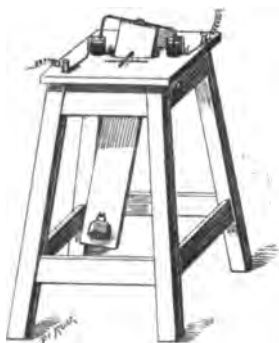
Expériences. — Opérer d'abord avec une pression du style juste suffisante pour laisser une trace sur le verre enfumé et constater l'isochronisme des oscillations peu amorties.

— Exagérer ensuite la pression du style pour amortir fortement les oscillations par frottement solide. Les oscillations sont-elles encore isochrones, les oscillations décroissent-elles en progression arithmétique? Peut-on tracer une droite tangente à toutes les sinuosités du tracé?

— Fixer enfin derrière la planche une tige recourbée portant une plaque métallique ($5^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}, 5$) qui, pendant l'oscillation, se déplacera normalement dans de l'huile contenue dans une boîte en fer-blanc ($20^{\text{cm}} \times 10^{\text{cm}} \times 8^{\text{cm}}$), et réduire au minimum la pression du style sur la plaque enfumée. Les oscillations restent-elles isochrones? La loi de décroissance des amplitudes se rapproche-t-elle plus de la progression géométrique que de la progression arithmétique? (139).

68. Comparaison chronographique des périodes de deux pendules et méthode des coïncidences. — *Montage.* — Constituer deux pendules pareils à celui de l'expérience précédente (II, 67).

Le long du bord supérieur de ces planches, fixer avec des cavaliers un fil de fer ($l = 25^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 2$) courbé à angle droit à 2^{cm} de chaque extrémité. Disposer deux petits vases cylindriques en porcelaine, dits pots à onguents ($V = 10^{\text{cm}^3}$) sous les pointes du fil de fer, et les fixer sur le tabouret avec de l'arcanson ou de la cire molle. On y versera des quantités de mercure suffisantes pour que, dans sa position d'équilibre, le fil de fer plonge dans le mercure d'environ 3^{mm} à chaque extrémité.

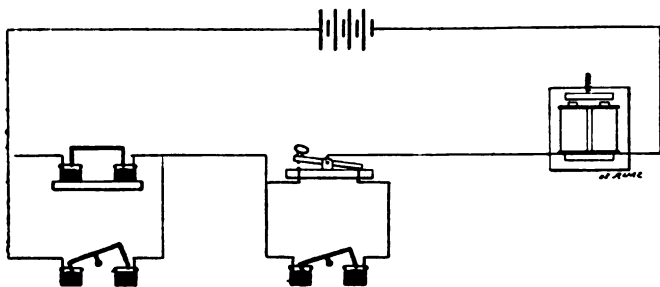


Préparer un interrupteur formé de deux godets de mercure collés à l'arcanson sur une planchette et d'un pont fait d'un fil de cuivre nu ($d = 0^{\text{cm}}, 2$) courbé en \cap .

Mettre dans le circuit des piles cet interrupteur, le manipulateur et le récepteur d'un télégraphe Morse. Monter l'un des pendules en dérivation sur l'interrupteur, et l'autre en dérivation sur le manipulateur Morse. Les circuits seront constitués par du fil de sonnerie.

Expériences. — Enregistrer d'abord les oscillations du pen-

dule en dérivation sur le manipulateur, en mettant l'autre pendule en court-circuit au moyen de son interrupteur. Au début et à la fin de l'expérience on enregistrera la seconde en même temps que les oscillations du pendule en frappant sur le manipulateur aux instants successifs indiqués par le tic-tac de l'horloge.



En examinant le ruban de papier, on distinguera bien aisément les *traits* dus au pendule et les *points* dus à l'enregistrement de la seconde. On déduira de ces enregistrements la durée de l'oscillation du pendule, et l'on se rendra compte de la précision de la mesure.

Enregistrer ensuite simultanément le mouvement des deux pendules; relever et marquer les traits correspondant à chacun des deux pendules, et déterminer la période du second pendule, en fonction de la période du premier, au moyen de l'observation des coïncidences.

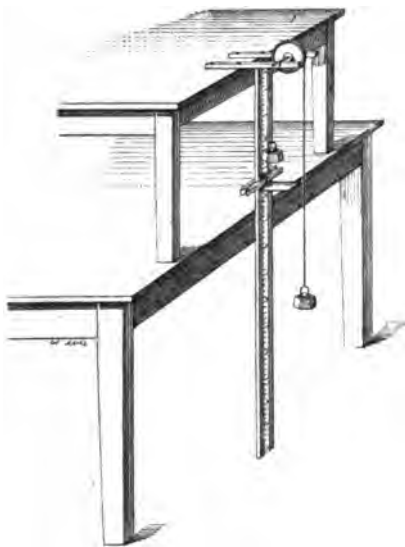
MASSE ET ACCÉLÉRATION.

69. Machine d'Atwood. — *Montage.* — Si l'on ne dispose pas d'une machine tout installée, on peut employer les dispositifs suivants.

Superposer deux tables. Visser sur la table supérieure les deux moitiés d'une règle carrée en bois dur, perpendiculairement à un bord de la table, en laissant entre elles un intervalle de 4^{cm} et en les faisant déborder de 15^{cm}. Clouer un mètre ruban le long d'une planche de sapin (160^{cm} × 5^{cm} × 1^{cm}, 8) et visser cette planche ver-

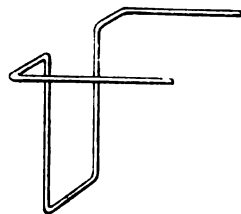
ticalement contre la ceinture de la table supérieure, au-dessous des règles en porte à faux.

Monter une poulie en laiton ($d = 9^{\text{cm}}, 5$) sur un axe d'acier (aiguille à tricoter, $d = 0^{\text{cm}}, 2$; $l = 12^{\text{cm}}$). suspendre sur cette poulie un fil de soie portant à chacune de ses extrémités un poids en fonte ($m = 200^{\text{g}}$), et poser l'axe de la poulie sur les



règles en porte à faux. Préparer un butoir formé par une plaque de zinc ($12^{\text{cm}} \times 6^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}}, 1$), pliée à angle droit au tiers de sa longueur et préparer aussi un support évidé fait d'un fil métallique ($d = 0^{\text{cm}}, 3$) plié à la pince.

Loi des espaces. — Sur la masse mobile la plus rapprochée de la règle divisée, mettre une surcharge faite d'un morceau de règle d'écolier ($l = 10^{\text{cm}}$), et soutenir cette masse mobile au moyen d'une planchette tenue à la main, en face d'une division déterminée de la règle graduée. Retirer brusquement la planchette à un battement d'un métronome ⁽¹⁾ et cher-

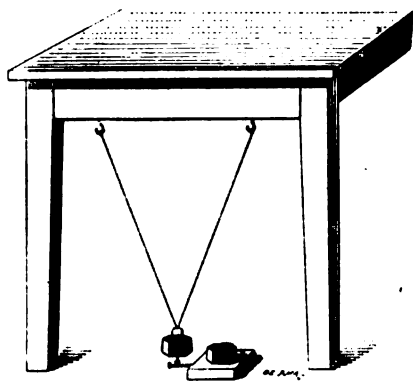


⁽¹⁾ Le métronome pourrait être remplacé par un réveil-matin ou par un pendule formé d'un fil auquel on attache un poids en fonte de 1^{re} sous le centre de gravité duquel on a suspendu une masse de quelques grammes, comme le repré-

cher par tâtonnements où l'on doit placer le butoir, tenu contre la règle avec des *pincés à ressort*, pour que le choc se produise au bout d'un temps t , $2t$, $3t$, ... en commençant par les plus grandes longueurs. On comparera les nombres obtenus avec ce que donnerait la loi du carré des temps.

On pourra réunir plusieurs expériences en une seule en faisant culbuter successivement, pendant une même chute, une série d'index de papier portés par des supports en fil de fer et placés aux points qui viennent d'être déterminés (64).

Vitesses. — Placer le support évidé sur la règle, en le fixant



aussi avec des *pincés à ressort*, de manière à enlever la surcharge au bout du temps t . Quel est l'espace parcouru, ensuite, pendant un temps t ou $2t$? Le mouvement est-il devenu uniforme?

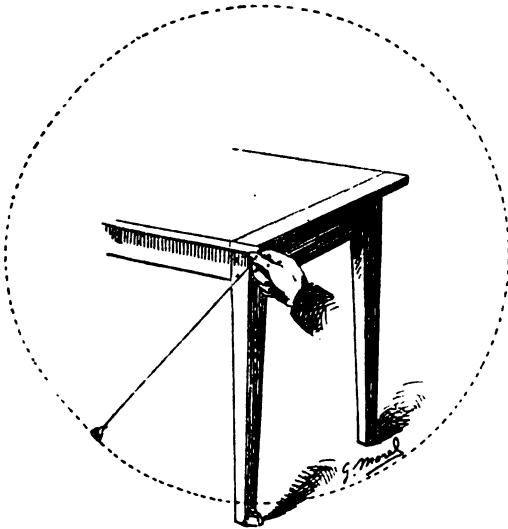
Forces; frottements. — Attacher une masse de $(30 - m)$ grammes sur l'une des masses mobiles et une masse de $(30 + m)$ grammes sur l'autre. Mesurer l'espace parcouru pendant le temps le plus grand possible et en déduire la valeur de l'accélération. Changer ensuite la valeur de m et construire la courbe des accélérations en fonction des variations du poids moteur.

On tracera la droite la plus voisine de cette courbe et, de son ordonnée à l'origine, on déduira la valeur de la force de frottement (qui ne vaut guère que quelques décigrammes).

sente la figure ci-dessus. A chaque oscillation, cette petite masse vient heurter une tige placée de manière à être rencontrée par le pendule dans sa position d'équilibre (212).

Influence de la masse totale et de la masse de la poulie. — Pour mesurer le rayon de giration de la poulie, on percera un trou dans la jante ($d = 0^{\text{cm}}, 2$) parallèlement à l'axe et à une distance a de cet axe. On y passera une aiguille à tricoter et l'on mesurera la période T des oscillations autour de ce nouvel axe. Ayant mesuré la circonférence c de la jante, on admettra qu'il faut ajouter aux masses principales la fraction de la masse de la poulie représentée par $\frac{T^2 ag - 4\pi^2 a^2}{c^2}$, et l'on comparera la valeur de l'accélération, obtenue expérimentalement, avec celle que donne alors la théorie classique.

70. Mouvement circulaire uniforme : mesure de la force. — Attacher solidement un poids en fonte de 50^{g} à l'extrémité d'un fil de caoutchouc carré ($l = 60^{\text{cm}}; e = 0^{\text{cm}}, 4$). Tenir à la

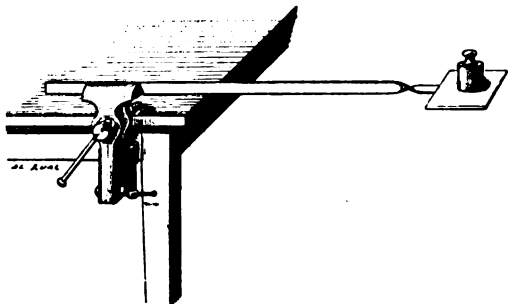


main l'extrémité du caoutchouc et faire tourner la masse mobile dans un plan vertical en plaçant la main dans une position bien déterminée; par exemple, au voisinage de l'angle d'un meuble. On réglera la vitesse de rotation de manière que la masse mobile effleure le sol en tournant, et l'on mesurera la période avec un compteur à secondes.

Pour connaître la force qui agissait pendant le mouvement il suffit de déterminer le poids qu'il faut suspendre au fil de caout-

chouc pour lui faire reprendre la longueur qu'il avait pendant la rotation. L'expression $m\omega^2 R$ représente-t-elle la valeur ainsi trouvée pour la force? (8).

71. Vibrations élastiques : comparaison des masses sans balance. — Préparer un ressort plat en acier ($50\text{cm} \times 1\text{cm}, 5 \times 0\text{cm}, 15$). Tordre ce ressort à angle droit à 6cm environ d'une extrémité, en opérant au rouge sombre, et le fixer dans un étau par l'autre extrémité. Coller enfin une lame de verre ($8\text{cm} \times 8\text{cm}$) sur la partie horizontale de la lame d'acier.



On centrera les masses étudiées sur le plateau de verre en les faisant tenir avec de la cire molle, et l'expérience consistera à mesurer la période d'oscillation (à $\frac{1}{200}$ près).

On substituera d'abord une masse de fonte (500g) à une masse de laiton ayant le même poids. La période de l'oscillation reste-t-elle la même? Deux corps qui ont le même poids ont-ils la même masse?

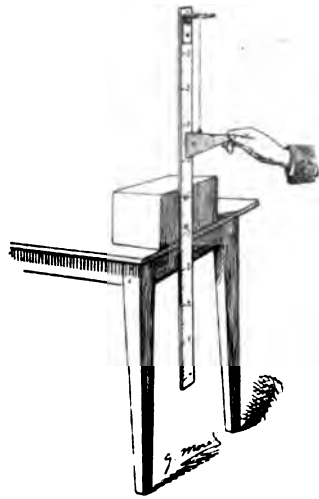
Employer ensuite successivement des masses croissant de 100g en 100g jusque vers 1kg , construire la courbe des carrés des périodes en fonction des masses oscillantes et tracer la droite la plus voisine de la courbe. Placer alors un objet quelconque sur le plateau de verre; déterminer la période d'oscillation et relever, sur la courbe, la masse correspondante. Faire aussi la pesée du corps et constater que l'écart reste dans les limites de précision des mesures de temps.

PENDULE.

72. Pendule simple. Mesure de g . — *Montage.* — Préparer une équerre métallique en pliant à angle droit, au tiers de sa longueur, une feuille de métal ($15\text{cm} \times 3\text{cm} \times 0\text{cm}, 2$); percer deux trous ($d = 0\text{cm}, 1$), l'un A au milieu, l'autre B vers l'extrémité du grand côté

de l'équerre ; visser cette équerre par son petit côté en haut d'un mètre en bois et visser le mètre contre un support (caisse en bois, $h = 20^{\text{cm}}$) qu'on placera au bord de la table.

— Avec du fil et une balle de plomb trouée (plomb de pêche, $d = 1^{\text{cm}}, 6$), faire un pendule qu'on suspendra en A. Ce fil sera suffisamment fixé en lui faisant faire plusieurs fois le tour de l'équerre de suspension sur laquelle on le fera adhérer avec de la cire molle.



Influence de l'amplitude. — Ayant pris un pendule d'environ 20^{cm} de longueur, on le fera osciller avec des écarts angulaires croissants. On appréciera l'amplitude α en plaçant un mètre horizontalement devant le pendule et l'on comparera l'augmentation relative de la période avec l'expression $\frac{\alpha^2}{16}$.

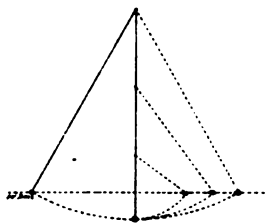
— On pourrait aussi comparer directement la durée des oscillations de grande amplitude et la durée des oscillations très petites en faisant osciller l'un devant l'autre deux pendules de même longueur et en observant les *coïncidences*. Mais on reconnaîtra aisément qu'il faudrait employer deux supports distincts pour que les mouvements des deux pendules fussent tout à fait indépendants.

Influence de la masse suspendue. — Mesurer les périodes de deux pendules de 1^{m} faits, l'un avec une balle de plomb, l'autre avec un poids en fonte de 50^{g} . Faire, aussi, osciller simultanément les deux pendules. Ont-ils même durée d'oscillation ?

Loi des longueurs. — Écarter le pendule de sa position d'équilibre à une distance inférieure à $\frac{l}{10}$ et le faire osciller. Mesurer la période en faisant durer les oscillations assez longtemps pour que la mesure soit faite à $\frac{1}{2000}$ près et déterminer la longueur du pendule en la reportant sur le mètre avec une équerre. Construire la courbe représentant les variations de la période en fonction de la longueur du pendule et la comparer avec la courbe $T^2 = \frac{4\pi^2 l}{g}$.

On prendra la moyenne des valeurs de $\frac{T^2}{l}$ et l'on en déduira une valeur de g qui devra être correcte à moins de 1 pour 100.

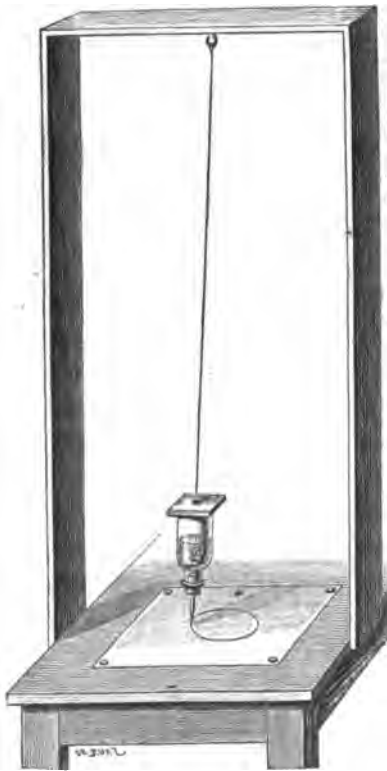
Vitesse et hauteur de chute. — Régler la longueur du fil à plomb de manière qu'il descende au-dessous du bord de la table, d'une longueur égale à environ $\frac{1}{10}$ de sa longueur et faire osciller le pendule en l'abandonnant sans vitesse initiale au niveau du bord de la table. Si l'on place, à différentes hauteurs, un butoir que le fil rencontre juste au moment où il passe dans la verticale, le pendule remonte-t-il au niveau de sa position initiale? (8, 18, 63, 129, 146, 170).



73. Pendule sphérique et composition des petits mou-

vements. — *Montage.* —

Dans le goulot d'un flacon ($V = 200^{\text{cm}^3}$) ajuster un bouchon traversé par un tube de verre ($l = 5^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}},7$) dont une extrémité est étirée jusqu'à un diamètre de $0^{\text{cm}},2$. Préparer, d'autre part, une planchette ($4^{\text{cm}} \times 4^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}},2$) percée d'un trou en son centre ($d = 0^{\text{cm}},2$). Faire passer un fil de cuivre ($l = 120^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}},03$) par ce trou et fixer la planchette sur le fond du flacon avec de l'arcanson.



Suspendre cet appareil à un support ($h = 100^{\text{cm}}$; $l = 10^{\text{cm}}$; $e = 1^{\text{cm}}$) de manière que le tube effilé arrive à 1^{cm} de la table d'expériences et s'assurer que la pointe de ce tube est bien dans le prolongement du fil de suspension.

Pour faire une expérience, on remplira le flacon de sable

finement tamisé et l'on placera une feuille de papier sous le pendule (41, 174, 191, 212).

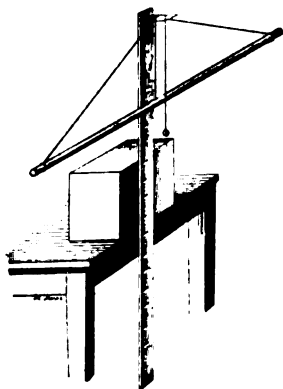
Mouvement rectiligne. — Faire osciller le pendule dans un plan, en évitant le balancement parasite du flacon au bout du fil, et déplacer le papier dans la direction perpendiculaire, avec une vitesse aussi constante que possible pour obtenir le tracé de la sinusoïde. On pourrait déplacer le papier d'un mouvement bien uniforme avec le dispositif déjà décrit (II, 65).

Mouvement elliptique. — Le pendule étant écarté de sa position d'équilibre d'un angle inférieur à $\frac{1}{13}$, lui donner une impulsion oblique et retirer le papier dès que le sable a tracé une courbe fermée. On tracera au crayon la courbe ainsi marquée et l'on pourra en étudier quelques propriétés. Le diamètre conjugué d'une direction de cordes quelconque est-il une droite? Le milieu de cette ligne est-il un centre? Ayant tracé les deux axes, on reportera sur le dessin quelques points de la courbe théorique $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$; se trouvent-ils sur la courbe expérimentale?

Amplitudes finies. — Laisser osciller le pendule pendant quelque temps et constater une rotation de l'ellipse, d'autant plus rapide que l'amplitude est plus grande.

74. Pendule composé. — *Montage.* — Disposer un mètre en bois formant support, comme pour l'étude du pendule simple (II, 72).

Fixer trois fils, l'un au milieu et les deux autres aux extrémités d'un cylindre de bois (manche à balai $2l = 80^{\text{cm}}$, $d = 2^{\text{cm}}$, 5); les passer tous trois par le trou de l'équerre de suspension, et régler leurs longueurs de manière que le cylindre soit horizontal (87).

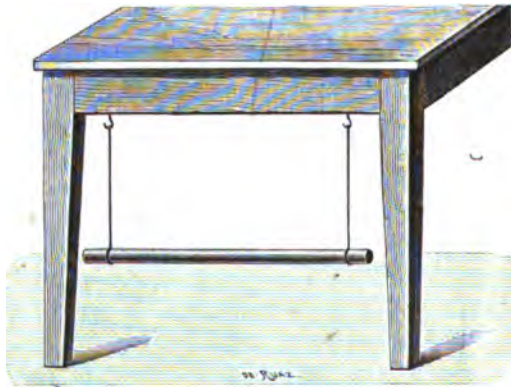


Existence d'un pendule simple synchrone. — Suspendre le cylindre horizontalement à environ 25^{cm} de l'équerre, le faire osciller autour d'un axe perpendiculaire à ses génératrices; mesurer la période à 1 pour 100 près et en déduire la longueur d'un pendule simple qui aurait même période. Cette longueur est-elle égale à la valeur $a + \frac{l^2}{3a}$? Construire un pendule simple ayant cette longueur et

formé d'un fil et d'une balle de plomb trouée ($d = 1^{\text{cm}}, 6$) et le faire osciller devant le pendule composé. Ces deux pendules s'accompagnent-ils constamment pendant leur oscillation?

Faire osciller ensuite le pendule en diminuant progressivement la longueur des fils de suspension et construire la courbe de la durée d'oscillation en fonction de la distance du centre de gravité à l'axe de suspension. La longueur $a = \frac{l}{\sqrt{3}}$ fournit-elle le minimum de la période?

Suspension bifilaire. — Suspendre le cylindre à la table au moyen de deux fils placés près des bouts; le faire osciller autour



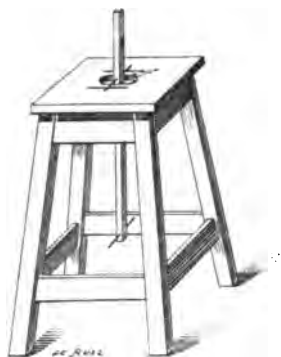
d'un axe vertical et voir comment le carré de la période dépend de la distance des points d'attache supérieurs, de la distance des points d'attache inférieurs et de la longueur des fils. De l'une des mesures, on déduira la valeur du moment d'inertie du cylindre par rapport à l'axe vertical. Cette valeur est-elle égale à $\frac{Ml^2}{3}$?

— Faire aussi osciller le pendule autour d'un axe horizontal parallèle ou perpendiculaire au cylindre suspendu. Quelle est la longueur du pendule simple synchrone? (202).

Pendule réversible. — Le pendule peut être fait d'une règle de bois dur ($l = 50^{\text{cm}}, e = 1^{\text{cm}}$). On perce près d'une extrémité un trou ($d = 0^{\text{cm}}, 1$) dans lequel on introduit un morceau d'aiguille à tricoter ($d = 0^{\text{cm}}, 1, l = 5^{\text{cm}}$) qu'on fixe avec de la cire à cacheter ou de l'arcanson; parallèlement à cette aiguille on en plante une autre à 32^{cm} de la première. On prendra comme sup-

port un tabouret de bois ($h = 55^{\text{cm}}$) sur lequel deux morceaux de règle de bois dur ou deux aiguilles à tricoter serviront de chape pour le roulement des axes de suspension.

Faire osciller le pendule successivement autour des deux axes; mesurer les périodes T et θ par l'observation de 100 oscillations et relever, enfin, la distance des axes *des deux côtés du pendule* en se servant d'une règle divisée en millimètres sur laquelle on appréciera les dixièmes de millimètre.



On calculera la valeur de g par la formule approchée $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$.
Y a-t-il quelque utilité à prendre la formule complète

$$g = 4\pi^2 l \frac{\alpha - \alpha'}{\alpha T^2 - \alpha' \theta^2} ?$$

Si cela est nécessaire, on pourra déterminer à $0^{\text{cm}}, 1$ près la position du centre de gravité en essayant de placer la règle en équilibre sur une lame de couteau.

75. Loi de décroissance des amplitudes pour une résistance proportionnelle à la vitesse. — Montage (voir la figure de la page suivante). — Souder une tige métallique ($d = 0^{\text{cm}}, 5, l = 15^{\text{cm}}$) perpendiculairement au centre d'un disque de zinc ($e = 0^{\text{cm}}, 2, d = 15^{\text{cm}}$), fixer vers l'autre bout de cette tige une rondelle de métal mince ($d = 4^{\text{cm}}$) sur laquelle on pourra faire reposer un autre disque pareil, percé d'un trou en son centre ($d = 0^{\text{cm}}, 8$). Souder encore un fil de fer ($d = 0^{\text{cm}}, 1, l = 25^{\text{cm}}$) sous cette rondelle pour servir d'index.

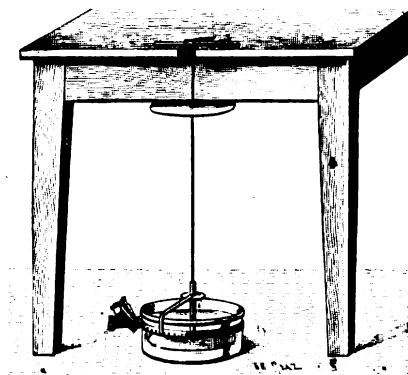
Souder un fil d'acier ($l = 40^{\text{cm}}, d = 0^{\text{cm}}, 04$) au milieu d'un trait de scie fait à l'extrémité de la tige; enfiler le disque percé et souder l'autre bout du fil dans un trou percé au milieu d'une seconde tige métallique ($d = 0^{\text{cm}}, 5, l = 15^{\text{cm}}$). Suspendre enfin le système oscillant sous une table ($h = 70^{\text{cm}}$) en faisant passer le fil d'acier par une fente pratiquée dans le bord de la table.

On disposera un cristalliseur ($d = 20^{\text{cm}}$) de manière que le disque inférieur oscille dans ce cristalliseur et on l'entourera d'un mètre ruban pour permettre la mesure des angles au moyen

de l'index de fil de fer qui sera replié à angle droit vers la graduation.

Expériences. — Remonter le disque supérieur et le faire tenir contre la table avec de la cire molle. Mesurer la période d'oscillation avec un seul disque oscillant dans l'air, puis la période d'oscillation avec les deux disques : la période est-elle exactement multipliée par $\sqrt{2}$?

Verser ensuite de l'eau dans le cristallisoir de manière que le



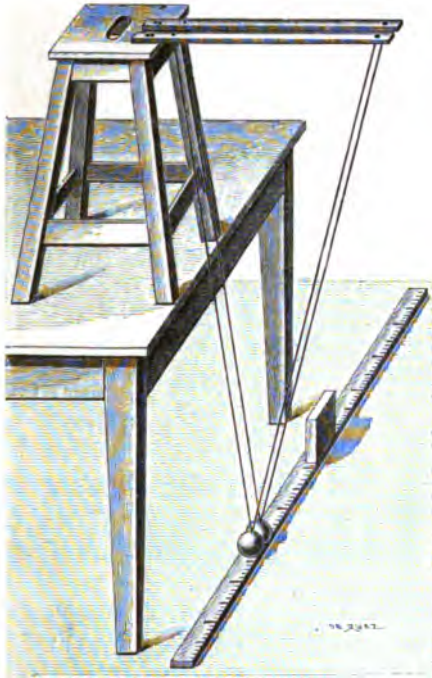
disque inférieur soit immergé et faire de nouveau osciller l'appareil avec un seul disque ou bien avec les deux disques. On étudiera la loi de décroissance des amplitudes en ayant soin de toujours placer l'œil dans le plan méridien de l'index pour la mesure des élongations. Les amplitudes décroissent-elles en progression géométrique? La raison de cette décroissance est-elle en raison inverse de l'inertie? Les périodes sont-elles notablement altérées? (18).

PERCUSSIONS.

76. Choc des corps élastiques. — *Montage.* — Se procurer deux grosses billes en pierre ($d = 3^{\text{cm}}$ et $3^{\text{cm}},5$) et leur faire, tout autour, avec la lime, des rainures de $0^{\text{cm}},2$ pour pouvoir les attacher par un fil. Après les avoir pesées, suspendre les deux billes à des supports en porte à faux, chacune au moyen de deux fils qu'on fixera en les enroulant deux ou trois fois sur les supports et en les arrêtant avec de la cire molle.

Pour disposer les supports on pourra couper deux lattes de bois

(70^{cm} , 3^{cm} , 1^{cm}) et les fixer, chacune par une seule vis, sur le siège d'un tabouret de bois ($h = 55^{\text{cm}}$). On les placera parallèlement en laissant entre elles un intervalle d'environ $2^{\text{cm}}, 5$, et en les faisant déborder d'environ 50^{cm} . On mettra ce tabouret sur une petite table ($h = 70^{\text{cm}}$) et cette table elle-même sur la table d'expériences.



Pour mesurer les déplacements des billes mobiles, on se servira d'un mètre que l'on posera sur la table, au-dessous de ces billes, et on les y projettera au moyen d'un bloc de bois rectangulaire (8^{cm} , 6^{cm} , 2^{cm}).

Expériences. — Régler les fils de suspension de manière qu'au repos les billes se trouvent être en contact, à 2^{cm} ou 3^{cm} au-dessus de la table d'expériences. On aura soin de placer les centres à la même hauteur, et de mettre la ligne des centres dans le plan d'oscillation.

L'appareil étant réglé, écarter l'une des billes de sa position d'équilibre d'une quantité connue, l'abandonner sans vitesse initiale et mesurer les élongations maxima des deux billes après leur

rencontre. Connaissant la période d'oscillation, on calculera les vitesses des mobiles avant et après le choc, et l'on pourra faire une correction pour tenir compte de l'amortissement des oscillations.

On s'assurera qu'au moment du choc il y a sensiblement conservation de la *quantité de mouvement* et de la vitesse du centre de gravité, mais qu'il y a une diminution notable de la force vive (176, 197).

77. Choc des corps mous. — Remplacer l'une des billes par un bloc de plomb d'une centaine de grammes et répéter les mêmes expériences. Il y aura encore conservation de la *quantité de mouvement*, mais avec une perte considérable de force vive (176, 197).

78. Déformation pendant le choc. — Laisser tomber une bille sur une plaque de métal (*marbre en fonte*) ou sur une pierre

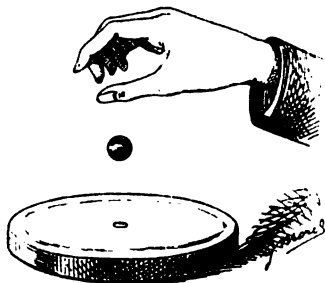


plate qu'on aura très légèrement huilée, et constater qu'en rebondissant, la bille laisse une trace circulaire d'autant plus large que la bille est plus grosse et qu'elle tombe de plus haut (156).

79. Expériences diverses montrant la grandeur des forces développées pendant le choc et la localisation de leurs effets. — Casser un manche à balai qui repose sur des appuis fragiles, en le frappant en son milieu avec un bâton. — Essayer d'enfoncer un clou dans une planchette tenue à la main, puis dans cette même planchette placée sur un bloc de métal (2^{ke}) qu'on tient aussi à la main. — Empiler des rondelles de bois (jeu de dames) et chasser l'une d'elles par le choc d'une règle plate. — Suspendre un corps un peu lourd par un fil, attacher un fil semblable sous ce corps : on brisera à volonté l'un ou l'autre des deux fils, selon que l'on tirera lentement ou brusquement sur le fil inférieur.

CHAPITRE III.

HYDROSTATIQUE. HYDRODYNAMIQUE. CAPILLARITÉ.

DENSITÉ D'UN CORPS SOLIDE.

1. Densité absolue. — Se procurer une grosse bille de pierre ($d = 3^{\text{cm}}, 5$), en mesurer plusieurs diamètres avec le pied à coulisse, la peser (au décigramme) et calculer sa densité. Quelle est la plus précise des deux mesures ? Y aurait-il avantage à mesurer le volume de la bille en l'immergeant dans une éprouvette graduée contenant de l'eau ?

On s'assurera que l'on augmenterait la précision de la mesure, en supposant connue la densité de l'eau et en calculant le volume de la bille au moyen de l'augmentation que paraît éprouver le poids d'un vase plein d'eau ($V = 200^{\text{cm}^3}$) quand on y suspend la bille. Pour cette dernière expérience la bille serait placée dans un support en fil de fer attaché au bout d'un fil de soie.

2. Méthode du flacon. — A défaut d'un flacon à densité, prendre un flacon ordinaire ($V = 100^{\text{cm}^3}$) sur le goulot duquel on marquera un repère avec un *crayon à écrire sur le verre*. Peser le flacon plein d'eau jusqu'au repère, peser environ 200^{g} de morceaux de plomb, puis peser le flacon contenant le plomb et rempli d'eau. D'après ces mesures, quelle est la densité du plomb ? Y a-t-il lieu de mesurer la température de l'eau ?

On pourra marteler ensuite le plomb et déterminer de nouveau sa densité, trouve-t-on la même valeur ?

3. Densité du sable. — Peser une centaine de grammes de sable sec, et déterminer son volume avec une éprouvette graduée. Quelle est la densité moyenne du mélange de sable et d'air ?

Ajouter ensuite dans l'éprouvette autant d'eau que le sable peut

en absorber et déterminer son augmentation de poids. Quelle est la densité moyenne du mélange de sable et d'eau et quelle est la densité propre du sable ?

4. Application du principe d'Archimède. — Peser un morceau de soufre (100^g), le suspendre à un fil et déterminer sa perte de poids quand on l'immerge dans l'eau. — Prendre aussi la densité d'un gros cristal de sulfate de cuivre par immersion dans du pétrole, ou par immersion dans une solution saturée de ce sel, ou même par immersion dans l'eau, soit en vernissant le cristal, soit sans le vernir, mais en opérant rapidement (218).

DENSITÉ D'UN LIQUIDE.

5. Méthode du flacon. — Peser un flacon vide ($V = 200^{cm^3}$) sur le goulot duquel on a marqué un repère avec un fragment de papier gommé, puis le peser plein d'eau jusqu'au repère et peser enfin le flacon plein du liquide dont on cherche la densité. Quelle est la précision de ces remplissages ? Avec quelle précision obtient-on les densités ?

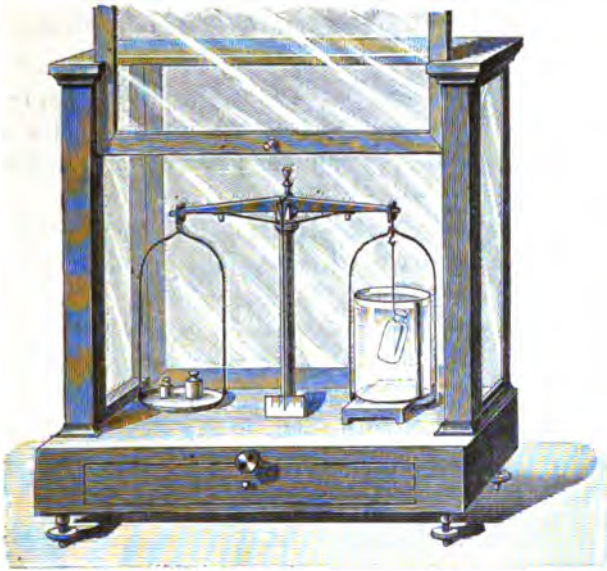
On déterminera de cette manière les variations de densité des solutions de carbonate ou d'hyposulfite de sodium en fonction de la concentration, et l'on construira la courbe représentative (18, 22).

6. Méthode de la poussée hydrostatique. Étude d'un aréomètre. — Préparer un flacon de verre ($V = 100^{cm^3}$), rempli d'eau, bouché et cacheté à la cire. Peser ce flacon en le suspendant par un fil à l'extrémité du fléau au-dessus du plateau d'une balance. On mettra, de ce côté, un petit tabouret passant par-dessus le plateau, mais lui laissant la liberté de ses mouvements. C'est sur ce tabouret qu'on place ensuite le vase ($V = 1^l$) contenant le liquide étudié — et l'on détermine la poussée subie par le flacon.

On fera la mesure avec des solutions d'hyposulfite de sodium de plus en plus concentrées dont on déterminera, d'autre part, le degré aréométrique.

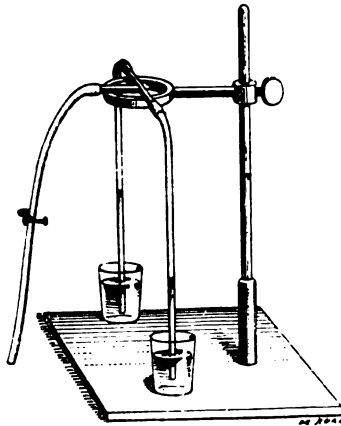
Ces mesures donnent les valeurs de la densité en fonction des lectures faites sur l'aréomètre ; on pourra les traduire en construisant la courbe des volumes spécifiques en fonction de la longueur dont émerge la tige de l'aréomètre.

— On vérifiera d'une manière analogue la graduation d'un alcoomètre centésimal et l'on constatera, notamment, la contraction



qui se produit dans la préparation des mélanges titrés d'eau et d'alcool (8).

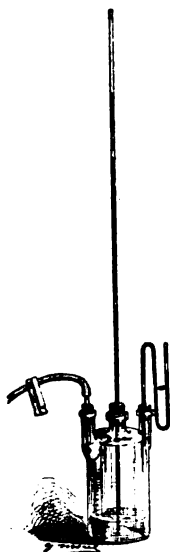
7. Manomètres comparés. — Préparer deux tubes de verre



($d = 0^{\text{cm}},8$; $l = 40^{\text{cm}}$) courbés à angle droit à une extrémité; les relier par des joints de caoutchouc (feuille anglaise $d = 0^{\text{cm}},8$) à

un tube en T, à la troisième branche duquel on adaptera un bout de tube de caoutchouc pouvant être fermé par une pince.

Soutenir verticalement les tubes dans des verres sans pied contenant les liquides à comparer (eau, pétrole, huile, alcool, etc.), aspirer par le tube de caoutchouc, mesurer à un millimètre près les colonnes de liquides soulevées et calculer le rapport des densités.



Autre dispositif. — Fixer un tube droit ($l = 100^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}},7$) dans le goulot d'un flacon à deux tubulures ($V = 250^{\text{cm}^3}$) et fixer dans une tubulure un tube en S ($3l = 60^{\text{cm}}$) contenant du mercure, l'autre tubulure étant pourvue d'un robinet. Mettre de l'eau dans le flacon et y refouler de l'air sous une pression d'environ 80^{cm} d'eau. Mesurer la hauteur d'eau soulevée en la reportant avec une équerre sur un mètre vertical, et mesurer, avec un double décimètre, la dénivellation du manomètre à mercure. Quelle est, d'après ces mesures, la valeur de la densité du mercure?

la valeur de la densité du mercure?

PESANTEUR DE L'AIR ET DES GAZ.

8. Poids du litre d'air. — Ajuster un bouchon de liège sur un ballon de 1^{l} , fixer une valve de bicyclette dans le bouchon et peser le ballon, la valve ouverte, à un centigramme près.

Mesurer le diamètre intérieur du cylindre et la course du piston d'une pompe de bicyclette. A l'aide de cette pompe, refouler environ $0^{\text{l}},5$ ou 1^{l} d'air dans le ballon en donnant un nombre entier de coups de piston. Déterminer l'augmentation de poids du ballon, évaluer le volume d'air refoulé et calculer le poids du litre d'air (95).

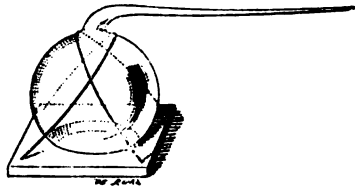
Au lieu d'opérer par refoulement on pourrait aussi commencer par faire le vide dans le ballon, peser, laisser rentrer l'air, peser de nouveau, puis remplir d'eau et peser encore pour avoir le volume du ballon. Dans ce cas, le bouchon serait traversé par un robinet ou par un tube de verre suivi d'un tube de caoutchouc fermé par

une pince, ou même par un simple tube effilé qui serait fermé par fusion.

On détermine de la même manière la masse spécifique du gaz carbonique, du gaz ammoniac, etc.

Étant donnée la précision des pesées, avec quelle précision faut-il mesurer la pression et la température ? Y aurait-il intérêt à employer un ballon-tare ? (22, 95).

9. Densité de la vapeur d'éther. — *Méthode de Dumas.* — Préparer un support fait d'une plaque de plomb ($7^{\text{cm}} \times 7^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}$) avec une ouverture centrale tronconique ($D = 5^{\text{cm}}$; $d = 4^{\text{cm}}$), et percer quatre trous dans les angles ($d = 0^{\text{cm}}, 5$).



Peser au demi-centigramme un ballon à densité ($V = 37,5^{\text{cm}^3}$) dont la pointe aura été ouverte.

Le chauffer très légèrement pour chasser un peu d'air, puis y faire rentrer quelques grammes d'éther en le laissant refroidir pendant que la pointe plonge dans le liquide.

Attacher le ballon sur son support. Faire bouillir de l'eau dans un récipient assez grand pour contenir le ballon. Quand l'eau est en pleine ébullition, on y plonge le ballon en le saisissant par la base du col avec une pince en bois. L'éther se met à bouillir. Lorsque le jet de vapeur est arrêté, on fond la pointe du col dans la flamme d'un bec Bunsen, à l'extrémité du cône bleu, en faisant bien couler le verre pour que la fermeture soit assurée.

Après refroidissement, essuyer le ballon et le peser au demi-centigramme.

Pour jauger le ballon, on le place dans un seau ou dans un cristalliseur plein d'eau froide, la pointe bien immergée, et l'on brise la pointe avec des tenailles ou une pince. Le ballon se remplit d'eau et on le pèse à un gramme près.

Pour calculer la densité de la vapeur d'éther, on ne tiendra pas compte de la bulle de gaz qui peut rester. Si la bulle est trop grosse, c'est que tout l'air n'avait pas été chassé au moment du remplissage, ou bien que la fermeture n'était pas étanche : il n'y a qu'à rejeter l'expérience.

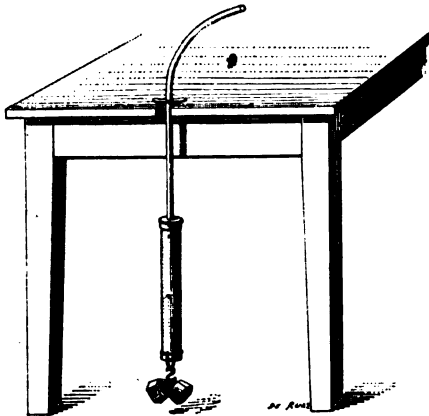
— On répétera les mesures avec de l'alcool absolu et l'on compa-

raera le rapport des densités avec le rapport des poids moléculaires.

PRESSIION ATMOSPHERIQUE.

10. Expériences qualitatives. — Évaluer l'effort nécessaire pour arracher un *tire-pavé* ou une patère pneumatique. — Retourner un verre plein d'eau fermé par une feuille de papier ou de mica. — Expériences du crève-vessie et des hémisphères de Magdebourg. — Faire sauter le bouchon d'un flacon plein d'air en faisant le vide autour. — Faire s'écraser par refroidissement une bouteille en métal mince que l'on a bouchée pendant que l'on y faisait bouillir de l'eau (8, 59, 77, 101, 110, 112).

11. Mesure directe. — Démonter et retourner le cuir d'une pompe de bicyclette. Suspendre verticalement cette pompe par le piston, le cylindre en dessous, en l'engageant dans une entaille



faite dans le bord de la table et mettre la pompe en communication avec la trompe à eau à l'aide d'un caoutchouc à vide. Le cylindre est aspiré. Attachant alors une ficelle bien symétriquement autour du cylindre, on déterminera le poids qu'il faut y suspendre pour le faire redescendre.

On reconnaîtra que le frottement cause une incertitude importante (environ $\frac{1}{3}$) et que l'on ne peut déterminer que les limites d'un équilibre indifférent du cylindre (107).

12. Construction d'un baromètre. — Prendre un tube de verre ($l = 100^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}$, 7), le sécher par des flambages répétés et l'étirer à une extrémité en un tube très fin ($l = 2^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}$, 01).

A l'aide d'un bouchon de liège, ajuster ce tube, la pointe en haut, dans le goulot d'un flacon tubulé de 250^{cm} , contenant du mercure sur une hauteur de 2^{cm} et fermer la tubulure par un bouchon traversé par une valve de bicyclette.

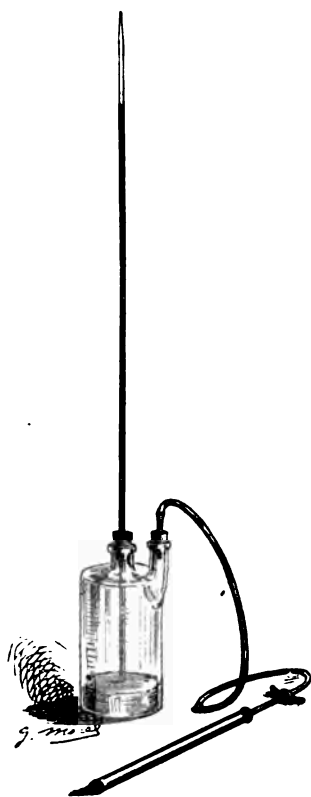
Comprimer de l'air dans le flacon, avec une pompe de bicyclette, jusqu'à ce que le mercure monte d'environ 60^{cm} dans le tube. Incliner l'appareil jusqu'à ce que le mercure perle à l'extrémité de la pointe capillaire ; fermer alors cette pointe en la fondant avec un chalumeau ou un bec Bunsen, et déboucher la tubulure du flacon.

Mesurer la hauteur barométrique (à 0^{mm} , 1 près) ; puis incliner l'appareil et mesurer la nouvelle hauteur verticale du mercure : était-il resté de l'air dans le tube ?

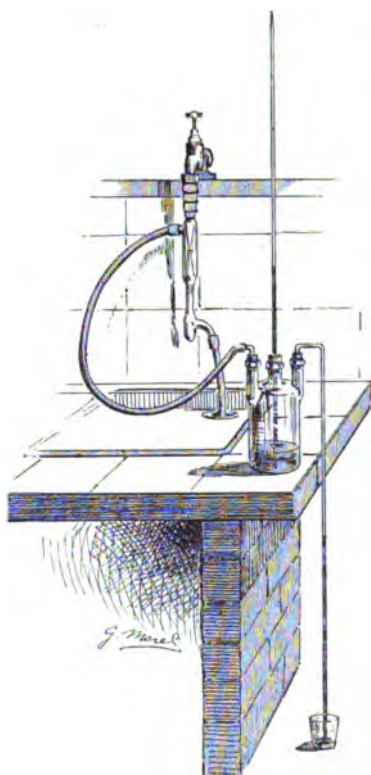
La hauteur barométrique est-elle la même en différents points de la salle ? Reste-t-elle encore la même en faisant l'observation au rez-de-chaussée et à un étage élevé ? (Observer, en même temps, un baromètre anéroïde.)

13. Manomètre barométrique. — Construire un baromètre comme dans l'expérience précédente, mais en se servant d'un flacon à deux tubulures. Dans l'une des tubulures, fixer un tube de verre ($l = 100^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}$, 3), deux fois courbé à angle droit et qui, passant par-dessus le bord de la table, vienne plonger dans un verre sans pied contenant du mercure sur une hauteur de 2^{cm} . En utilisant la seconde tubulure, on reliera le flacon tubulé à la trompe à eau.

Aspirer l'air progressivement en mesurant (à 1^{mm} près) la hau-



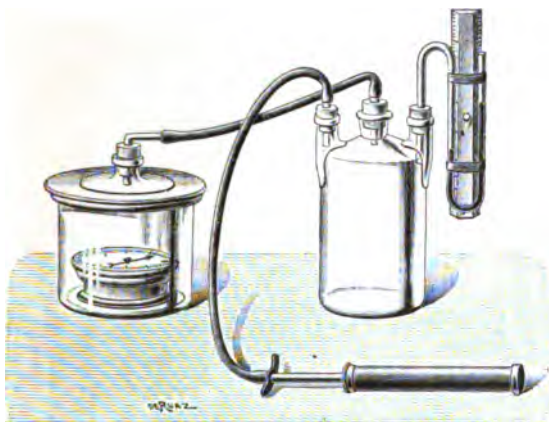
teur des colonnes de mercure au-dessus de la table et au-dessus du sol, leur somme reste-t-elle constante ?



14. Comparaison d'un baromètre anéroïde (1) et d'un baromètre à mercure. — Montage. — Placer un petit baromètre anéroïde dans un vase étanche (dessiccateur cylindrique en verre, avec couvercle plat rodé, à douille) ($d = 12^{\text{cm}}$). Ajuster le couvercle en interposant un anneau découpé dans une feuille de caoutchouc ($e = 0^{\text{cm}}, 05$) en graissant légèrement ou mouillant les surfaces; attacher ce couvercle avec des bracelets de caoutchouc fortement tendus (les bracelets de caoutchouc ne sont pas représentés sur la figure). Fixer enfin dans le bouchon de la douille un tube de verre courbé à angle droit ($d = 0^{\text{cm}}, 7$; $l = 10^{\text{cm}}$).

(1) On fera bien d'apprendre à régler un baromètre anéroïde enregistreur.

Ajuster un tube semblable dans le goulot d'un flacon à deux tubulures ($V = 1^l, 5$). Fixer dans une tubulure une valve de bicyclette. Fixer dans l'autre tubulure un tube deux fois recourbé ($3 l = 70^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 7$) formant manomètre à mercure, entre



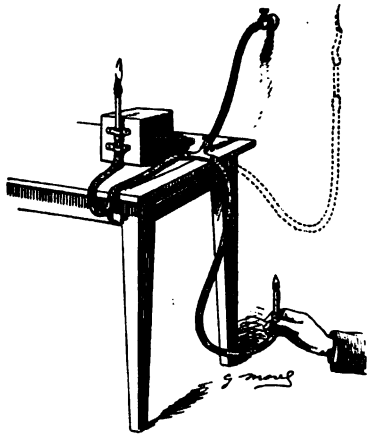
les branches duquel on attachera un double décimètre au moyen de bracelets de caoutchouc. Relier enfin les deux parties de l'appareil par un tube de caoutchouc solidement ligaturé sur les tubes de verre avec un fil métallique ($d = 0^{\text{cm}}, 05$) tordu à la pince.

Expériences. — Refouler lentement de l'air dans l'appareil avec une pompe à bicyclette et faire les lectures de pression de centimètre en centimètre sur le baromètre anéroïde et sur le tube manométrique auquel on imprimera de petites secousses pour que le mercure puisse prendre sa position d'équilibre normal.

Retirer ensuite la valve de bicyclette et la remplacer par un tube de verre mis en relation avec la trompe à eau par un caoutchouc à vide. Aspirer alors l'air très lentement et continuer les lectures simultanées. Les deux instruments fournissent-ils les mêmes valeurs pour les *variations* de la pression ?

L'expérience sera complétée en déterminant la valeur absolue de la pression par l'observation du baromètre à mercure (**III, 12**). On imprimera de légères secousses à la tige du baromètre au moment de la lecture. Y a-t-il une différence sensible entre les indications des deux instruments ? Est-il nécessaire de tenir compte de la correction de capillarité ? Est-il nécessaire de faire une correction de dilatation ? (18).

15. Variations de pression d'un gaz avec l'altitude. Surfaces d'égale pression. —



Deux tubes de verre tenus verticalement ($l = 10^{\text{cm}}$, $d = 0^{\text{cm}}$, 8) sont reliés à un même robinet à gaz au moyen d'un tube en T et de tubes de caoutchouc ($l = 100^{\text{cm}}$).

Placer les deux tubes au même niveau, allumer le gaz au bout des deux tubes, et régler le robinet de manière à avoir des flammes hautes de 5^{cm} à 10^{cm} .

Si l'on descend l'une des flammes, elle diminue de hauteur jusqu'à s'éteindre. On déplacera cette flamme le long du mur et l'on tracera à la craie la

ligne de niveau, lieu des points où l'extinction est presque obtenue.

— Serrer le tube de caoutchouc de la flamme fixe avec une pince à vis de manière à créer une certaine perte de charge et tracer la nouvelle ligne de niveau. Est-elle parallèle à la première? (7, 154).

MANOMÈTRES.

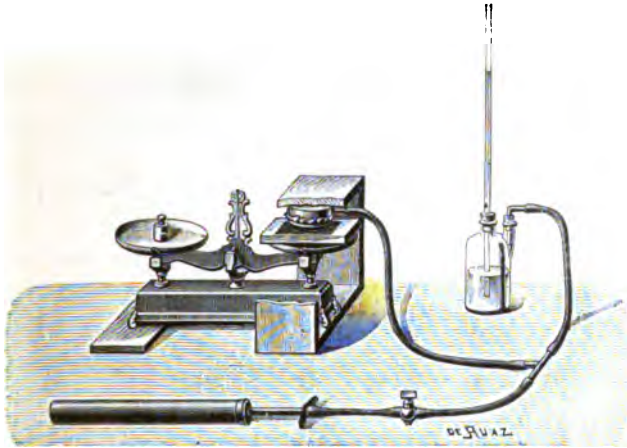
16. Manomètre à poids : appareil à membrane. — *Montage.* — Préparer une boîte métallique sans couvercle ($d = 6^{\text{cm}}$, $h = 3^{\text{cm}}$), munie d'un tube soudé latéralement ($l = 2^{\text{cm}}$, 5, $d = 0^{\text{cm}}$, 8). Tendre une feuille de caoutchouc ($e = 0^{\text{cm}}$, 04) sur l'ouverture, et la fixer à l'aide de quelques tours de fil en ayant soin que le caoutchouc ne fasse pas de plis dans la ligature.

Faire d'autre part un manomètre à eau avec un flacon tubulé ($V = 250^{\text{cm}^3}$), en fixant dans le goulot un tube de verre vertical ($l = 100^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}$, 7), et dans la tubulure, un tube coudé (0^{cm} , 7; 5^{cm} ; 5^{cm}).

À l'aide d'un tube en T et de tubes en caoutchouc, relier enfin ce manomètre et la boîte cylindrique à une pompe de bicyclette en interposant un robinet d'arrêt.

Placer maintenant une plaque de verre ($10^{\text{cm}} \times 10^{\text{cm}}$), sur une planche ($15^{\text{cm}} \times 15^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}$, 8), en la faisant tenir avec des pointes. Mettre cette planche, le verre en haut, sur le plateau d'une

balance de Roberval. Disposer ensuite un cadre vertical fait de planchettes ($10^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}},8$) vissées ensemble et fixer la capsule manométrique avec de l'arcanson, à l'intérieur de ce cadre, le caoutchouc vers le bas, comme l'indique la figure. — La largeur du



cadre devra être suffisante pour qu'il puisse entourer la balance du côté où se trouve la plaque de verre, et sa hauteur sera telle que la plaque de verre arrive à quelques millimètres de la membrane de caoutchouc quand la balance est dans sa position d'équilibre (87).

Expériences. — Enfumer la plaque de verre, la replacer sur la balance et tarer. Refouler de l'air dans l'appareil de manière à avoir une pression d'environ 50^{cm} d'eau, puis mettre des poids dans le plateau libre de la balance, en évitant tout mouvement brusque. Lorsque l'équilibre est atteint, la force que l'air comprimé exerce sur la surface de contact de la membrane et de la plaque de verre se trouve mesurée par la balance. On mesure alors la hauteur d'eau soulevée.

On décharge ensuite la balance avec précaution, puis on laisse la pression atmosphérique se rétablir dans l'appareil. On peut alors mesurer la colonne d'eau soulevée par capillarité, qui devra être retranchée de la hauteur manométrique.

Pour avoir la valeur absolue de la pression, et pour pouvoir la comparer à celle qu'indiquait le manomètre à eau, il n'y a plus qu'à connaître l'étendue de la surface de contact qui s'est imprimée sur le verre enfumé.

Il suffit, pour cela, d'appliquer la plaque enfumée contre du papier quadrillé en millimètres carrés et de compter les carrés contenus dans l'aire à mesurer.

— On pourrait aussi tirer une épreuve photographique sur papier sensible. — On peut même tirer une épreuve imprimée sur du papier ordinaire préalablement humecté d'essence de térébenthine, puis essuyé, et que l'on applique contre la plaque enfumée en le frottant énergiquement par derrière. — Une fois l'épreuve obtenue, on en découpe le contour, puis on découpe une feuille de plomb de même étendue ($e = 0^{\text{cm}}, 05$), et l'on pèse.

17. Appareil à piston. — Au centre d'une planchette



($25^{\text{cm}} \times 10^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}, 8$), percer un trou permettant d'entrer à frottement le cylindre d'une pompe de bicyclette.

Soutenir la pompe par sa tige, le cylindre en haut et la relier à un manomètre à mercure formé par un flacon tubulé de 250^{cm^3} ayant un tube de verre fixé dans le goulot ($l = 100^{\text{cm}}, d = 0^{\text{cm}}, 5$).

Charger la planchette avec des poids croissant jusqu'à quelques kilogrammes et mesurer la hauteur de mercure soulevée sous chaque charge en opérant par charges croissantes. — Calculer la charge réellement soulevée par l'air comprimé. La différence due au frottement (environ $\frac{1}{3}$), est-elle proportionnelle à la pression?

18. Gazomètre manométrique. — *Montage.* — Placer une balance de Roberval sur un tabouret ($h = 55^{\text{cm}}$); attacher une baguette de bois horizontalement sous l'un des plateaux et y suspendre une cloche à douille ($V = 5^{\text{l}}$), renversée dans un seau d'eau ($V = 10^{\text{l}}$). — Placer dans ce seau un tube de plomb ($d = 13^{\text{mm}}$), recourbé de manière à pouvoir mettre l'intérieur de la cloche en communication avec l'atmosphère.

Au moyen de tubes de caoutchouc et d'un tube en T, on mettra le tube de plomb en communication avec une pompe de bicyclette, ou avec une trompe à eau, ainsi qu'avec un flacon tubulé formant



manomètre à eau. — On interposera un robinet d'arrêt permettant d'isoler l'ensemble des deux appareils manométriques.

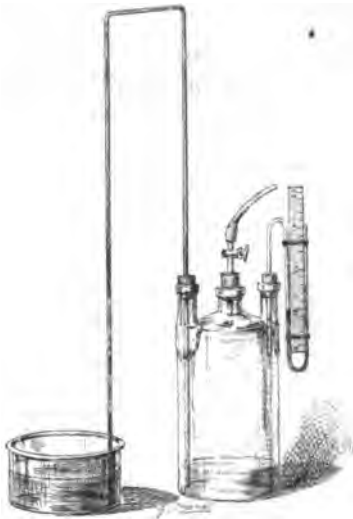
Expériences. — Équilibrer la cloche à la pression ambiante et noter le niveau de l'eau dans le seau. Aspirer ensuite ou

A.

refouler un peu d'air, ou bien mettre l'appareil en communication avec la canalisation de gaz d'éclairage et rétablir l'équilibre en ayant soin de ramener le niveau de l'eau dans le seau à sa hauteur primitive. On mesurera en même temps la dénivellation du manomètre à eau, et l'on déterminera enfin le diamètre intérieur de la cloche.

Les dénivellations du manomètre sont-elles proportionnelles aux efforts exercés sur la cloche? La valeur absolue de ces efforts est-elle égale à celle que l'on calcule en fonction de la dénivellation et du diamètre de la cloche? (18).

19. Manomètre à deux liquides. — *Montage.* — Prendre un flacon à deux tubulures ($V = 1^l$). Ajuster dans une tubulure un



tube en S ($d = 0^{\text{cm}}, 7$; $3 l = 45^{\text{cm}}$), et dans l'autre, un grand tube en U renversé ($d = 0^{\text{cm}}, 7$; $2 l = 100^{\text{cm}}$), descendant au fond du flacon. Fixer dans le goulot un robinet suivi d'un tube de caoutchouc, ou bien un tube de verre suivi d'un tube de caoutchouc muni d'une pince.

Expériences. — Mettre du pétrole dans le flacon sur une hauteur d'environ 2^{cm} , et faire plonger l'extrémité libre du grand tube en U dans un petit cristalliseur ($d = 10^{\text{cm}}$), contenant de l'alcool à brûler, dont le niveau sera d'environ 1^{cm} plus élevé que

celui du pétrole dans le flacon; cet alcool pourra être coloré par une trace de couleur d'aniline.

Souffler dans le flacon, en bouchant le tube en S, de manière à amorcer le tube en U. Rétablir ensuite la pression atmosphérique; marquer avec du papier gommé l'endroit où se fixe la surface de séparation des deux liquides dans le grand tube et verser, enfin, un peu d'eau dans le tube en S.

L'appareil étant ainsi disposé, on produira dans le flacon des variations de pression de quelques centimètres d'eau et l'on construira la courbe représentant les déplacements du ménisque alcool-

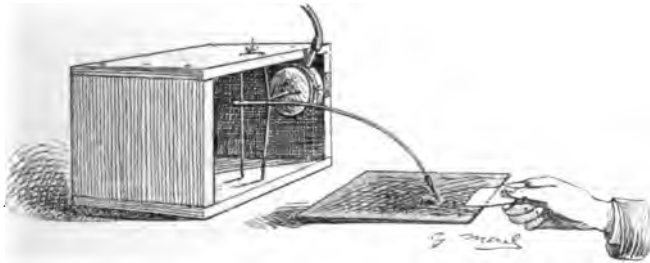
pétrole, en fonction de la dénivellation dans le tube en S. On déterminera ainsi le rapport des sensibilités des deux manomètres.

Cela fait, on mesurera les densités des deux liquides par la méthode du flacon (avec un flacon ordinaire de 250^g), et l'on comparera la sensibilité observée avec celle que l'on déduit des valeurs trouvées pour les densités. Peut-on conduire le calcul en considérant les sections des vases comme infiniment grandes?

20. Transmission des pressions. Tambour à levier. — Préparer deux capsules métalliques tubulées, fermées par des membranes (III, 16), relier ces deux capsules par un tube de caoutchouc et constater que toute déformation de l'une des deux membranes se transmet à l'autre.

On transforme l'une des capsules en système enregistreur en amplifiant les déplacements de la membrane par un levier inscripteur. On transmet au levier les mouvements de la membrane au moyen d'un fil attaché à un fragment de feuille de caoutchouc percé d'un trou, que l'on fera adhérer sur la membrane avec de la colle à caoutchouc. Ce fil sera de longueur telle que la membrane soit légèrement tendue.

Prendre pour levier une lame de jonc ou de roseau (20^{cm}; 0^{cm},6; 0^{cm},1); y percer deux trous ($d = 0^{\text{cm}}, 2$) à 1^{cm} et 3^{cm} de l'une des



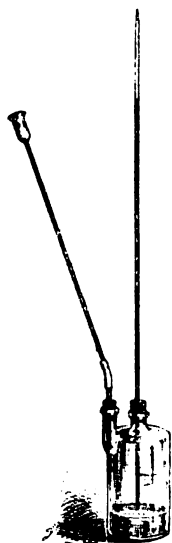
extrémités et fixer à l'autre extrémité un style découpé dans une lame de clinquant ($e = 0^{\text{cm}}, 015$), où l'on ménage des rebords que l'on replie pour le faire tenir sur la lame de bois.

Le levier sera supporté par deux fils de caoutchouc (0^{cm}, 2) tendus parallèlement et passant dans les trous du levier. On pourra, par exemple, tenir ces fils au moyen d'un support en bois, en forme de caisse ouverte ($h = 12^{\text{cm}}$), dont deux faces opposées sont percées des trous nécessaires pour le passage des fils. — La

capsule sera fixée contre une face intérieure de la caisse. On pourra faire tenir cette capsule avec de l'arcanson, ou bien encore souder sur le fond de la capsule une lame métallique (5^{cm}; 2^{cm}; 0^{cm},1), repliée en équerre, et que l'on vissera sur le bord du support.

PRESSIONS DANS UN LIQUIDE.

21. Mesure avec le baromètre. — Préparer un baromètre (III, 12) et mesurer la hauteur du mercure. Remplir ensuite le flacon tubulé avec de l'eau et lire la nouvelle hauteur du mercure. Quelle est la pression de l'eau au fond du flacon?



Adapter à la tubulure un bouchon traversé par un tube de verre ($l = 10^{\text{cm}}$, $d = 0^{\text{cm}},7$), suivi d'un long tube droit à entonnoir et verser de l'eau dans le tube à entonnoir. Placer ce tube sous différentes inclinaisons et comparer la pression que l'on mesure avec celle que donnerait la formule $p = p_0 + hdg$. Les hauteurs seront mesurées avec un mètre posé verticalement sur la table et sur lequel on reportera les niveaux avec une équerre; on pourra faire les mesures à un millimètre près.

Y a-t-il lieu de tenir compte des variations de niveau du mercure dans le flacon? (147).

22. Pression de bas en haut. — Découper un morceau de carton mince (6^{cm}; 6^{cm}; 0^{cm},03), l'humecter et l'appliquer contre l'ouverture d'un verre de lampe ($l = 20^{\text{cm}}$; $d = 5^{\text{cm}}$) autour duquel on aura mis un bracelet de caoutchouc.

Enfoncer le tout verticalement dans une conserve ($V = 3^{\text{l}}$) contenant de l'eau. Poser doucement une tige de fer de poids connu ($l = 25^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}},7$; $d = 1^{\text{cm}}$; $d = 1^{\text{cm}},5$), contre le carton, le point d'appui bien centré et remonter lentement le verre de lampe, en suivant le niveau de l'eau avec le bracelet de caoutchouc. On notera la position pour laquelle le carton se détache.

Mesurer ensuite (à un millimètre près) le diamètre moyen de l'ouverture du verre de lampe, et comparer les résultats obtenus avec ceux que donnerait la formule $P = \frac{\pi D^2 h}{4}$.

La concordance a-t-elle lieu à 1^{er} ou 2^{es} près? — Les écarts peuvent-ils être attribués à l'incertitude des mesures? (64, 73).



23. Égalité de pression dans les deux sens. — Conservant les mêmes dispositifs, on versera dans le verre de lampe de l'eau qui pourra être colorée par une trace de couleur d'aniline. A quel moment le carton se sépare-t-il ?

24. Pression sur une paroi verticale. — Préparer une boîte métallique avec membrane de caoutchouc (III, 16), et lui adapter un tube de verre ($l = 30^{\text{cm}}, d = 0^{\text{cm}}, 8$). Au moyen d'un tube en T, relier cet appareil à un manomètre à eau (flacon tubulé de 250^{cc} et tube de verre vertical) et à un tube de caoutchouc ($l = 100^{\text{cm}}, d = 0^{\text{cm}}, 8$) muni d'un robinet.

Plonger la capsule dans une conserve pleine d'eau ($V = 3^{\text{l}}$) comme l'indique la figure de la page suivante. Insuffler de l'air jusqu'à ce que la membrane, vue à travers la surface de l'eau, soit redevenue plane et noter le niveau de l'eau dans le tube du manomètre.

L'équilibre subsiste-t-il quand on oriente la membrane dans différentes directions ou qu'on la déplace horizontalement dans le liquide? Quelle relation y a-t-il entre la pression de l'air et la profondeur à laquelle la membrane est immergée? Comment l'expé-

rience est-elle modifiée quand la capsule exploratrice est remplie d'eau? (18, 41, 103, 126, 166, 167, 172, 174).

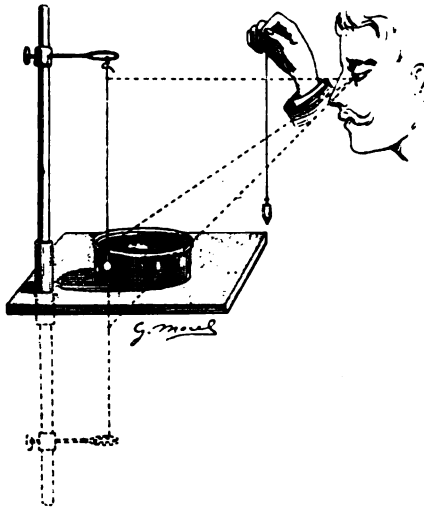


25. Pression du sable. — Essayer d'enfoncer verticalement un cylindre de bois ($l = 20^{\text{cm}}$, $d = 2^{\text{cm}}, 5$) dans du sable en le chargeant de poids en fonte.

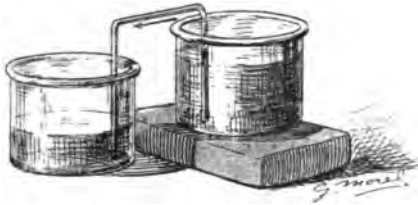
La formule $P = \frac{\pi D^2 h \rho}{4}$ représente-t-elle encore la pression? Cette formule est-elle plus voisine de la réalité quand on emploie du sable abondamment mouillé?

26. Surface libre. Surface de séparation. — Suspendre un fil à plomb au-dessus d'une cuve ($d = 30^{\text{cm}}$) contenant de l'eau fortement colorée (avec de l'encre), de manière que le plomb soit immergé. Suspendre un deuxième fil à plomb à environ 30^{cm} du premier et les regarder simultanément sur un fond clair en les projetant presque l'un sur l'autre. Les deux fils paraissent-ils parallèles? L'image du fil mouillé, vue par réflexion sur la surface de l'eau, est-elle dans le prolongement de ce fil? La vérification ainsi faite est-elle meilleure que celle que l'on obtiendrait avec un seul fil à plomb et une équerre?

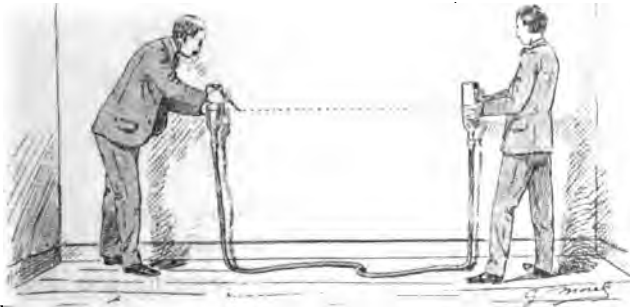
On répétera cette expérience avec du mercure, puis avec du mercure recouvert d'eau : les résultats sont-ils encore les mêmes ?



27. Vases communicants. — Faire communiquer deux



crystallisoirs contenant de l'eau au moyen d'un tube de verre



recourbé ($d = 0^{\text{cm}}, 7$; $2l = 20^{\text{cm}}$) formant siphon. Les surfaces libres se placent-elles au même niveau ?

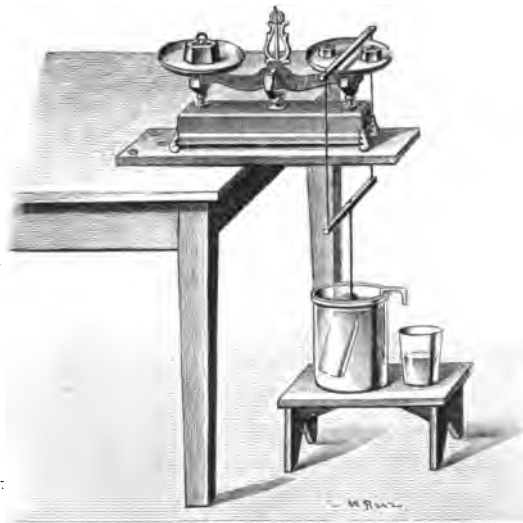
— Construire un niveau d'eau avec deux fioles reliées par un long tube de caoutchouc : on pourra prendre comme fioles à niveau des bouteilles dont on aura coupé le fond. Tracer ensuite une ligne horizontale sur le mur en appliquant les deux fioles contre les points à repérer.

— Faire le nivellement de la salle avec un niveau d'eau.

PRINCIPE D'ARCHIMÈDE.

28. Poussée dans un liquide. — *Montage.* — Installer une balance de Roberval sur une planche, juste assez large pour la porter, et que l'on aura vissée en porte à faux sur la table ; puis suspendre une baguette de bois horizontalement sous l'un des plateaux.

Préparer encore, d'une part, un siphon de verre (diam. intér. $0^{\text{cm}}, 5$ à $0^{\text{cm}}, 6$; $L = 10^{\text{cm}}$; $l = 5^{\text{cm}}$; écartement 3^{cm} à 4^{cm}) et, d'autre part, un flacon de 500^{e} , plein d'eau et bouché. (41).



Essai du vase à déversement. — Placer sous la balance une conserve de 2^{l} , pleine d'eau, amorcer le siphon et le fixer avec de la cire molle sur le bord du vase. — Verser un peu d'eau avec une éprouvette graduée et apprécier la quantité d'eau nécessaire pour amorcer l'écoulement. Apprécier aussi avec quelle précision l'eau ajoutée au vase est rendue par le trop plein. Avec

quelle précision le niveau de l'eau est-il, par conséquent, inva-riable?

Au moment des mesures qui vont suivre, on versera à deux reprises environ $0^1,5$ d'eau dans le vase à déversement, pour en mouiller les parois. (41).

Mesure de la poussée. — Peser ensemble (à $0^8,5$ près) le fla-con plein d'eau et une conserve de 1^1 . Suspendre ensuite le fla-con sous la balance, par un fil, et répéter la pesée en immergeant ce fla-con dans le vase à déversement. On recueillera dans une autre conserve le liquide déplacé et on le versera dans le vase que l'on a laissé sur la balance. L'équilibre est-il rétabli? Le principe d'Archi-mède se trouve-t-il vérifié au millième?

— Apprécier la quantité d'eau qui peut rester adhérente aux parois du vase auxiliaire : y a-t-il intérêt à supprimer ce vase et à recueillir directement l'eau dans la conserve tarée?

— La vérification serait-elle aussi bonne si l'on prenait comme corps immergé un flacon beaucoup plus petit (30^8)?

Mesure de la réaction sur le liquide. — Placer la conserve de 2^1 sur la balance, immerger complètement le flacon, soutenu par un fil tenu à la main, sans lui laisser toucher le fond et mesurer l'augmentation de poids. Est-elle égale, au millième près, à la poussée de l'expérience précédente?

— Si l'on dispose de deux balances, on peut les placer l'une sous l'autre et réunir les deux expériences précédentes en une seule. L'équilibre se rétablit simultanément pour les deux balances par le transvasement du liquide déplacé.

— On montre aussi l'égalité de la réaction et de la poussée en pesant d'abord un vase plein d'eau et le flacon posé à côté. On met ensuite le flacon au fond de l'eau et l'équilibre se maintient.

Équilibre des corps flottants. — Ayant préparé un flacon de 500^8 à moitié plein d'eau et bouché, on répète une expérience analogue à celle du principe d'Archimède : le flacon flotte au lieu de plon-ger dans l'eau et le poids de l'eau recueillie par déplacement doit être égal au poids du flacon.

On répétera la même expérience en remplaçant l'eau de la con-serve par du pétrole; le poids du liquide déplacé est-il encore égal au poids du corps flottant? (4, 41, 43, 62, 64, 73, 108, 126, 137, 138).

29. Poussée dans un gaz. — Suspendre un ballon de verre

de 8^l sous la balance, en le laissant pendre dans un seau cylindrique ($D = 27^{\text{cm}}$), et équilibrer le ballon. Faire couler du gaz carbonique dans le seau et mesurer la perte de poids du ballon. On comparera le résultat obtenu avec la valeur que l'on peut calculer en déduisant le diamètre du ballon de la mesure de sa circonférence.

Faire ensuite couler du gaz carbonique dans le ballon : l'équilibre est-il rétabli? La précision de ces mesures exige-t-elle que l'on tienne compte de l'épaisseur des parois du verre?

Si l'on voulait calculer la densité du gaz, avec quelle précision faudrait-il mesurer la température et la pression? Y aurait-il lieu de tenir compte de l'humidité des gaz? (18, 43, 62, 77, 107)

— Peser aussi une vessie ou un grand sac en papier mince, le gonfler d'air et peser de nouveau; y a-t-il augmentation de poids?

MOUVEMENTS DES FLUIDES.

30. Étude expérimentale du balancement général d'une masse d'eau. — Remplir d'eau, à mi-hauteur, un bac d'accumulateur ($h = 20^{\text{cm}}$; $L = 30^{\text{cm}}$; $l = 15^{\text{cm}}$) et faire balancer l'eau du vase dans le sens de la grande longueur; les oscillations sont-elles isochrones? Faire ensuite osciller l'eau dans le sens de la largeur et comparer le rapport des périodes dans ces deux expériences, avec le rapport des dimensions longitudinales.



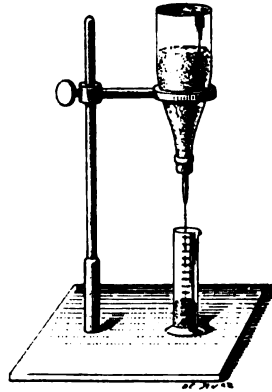
— Mettre dans le bac des quantités d'eau variables et construire la courbe donnant le carré de la période de balancement en fonction de la profondeur de la nappe d'eau.

— Revenant aux oscillations dans le sens de la grande longueur, on produira le mouvement du liquide à l'aide de deux planchettes tenues à la main et déplacées en sens inverse, symétriquement par rapport au milieu du vase. On cherchera la période de synchronisation et on la comparera avec la période d'oscillation propre de la première expérience (52).

31. Construction d'une horloge à sable. — Fermer une bouteille par un bouchon traversé par un tube de verre effilé ($l = 5^{\text{cm}}$; $D = 0^{\text{cm}}, 7$; $d = 0^{\text{cm}}, 2$). Remplir cette bouteille avec du sable sec passé au tamis (vingt brins au centimètre) et la renverser sur un support à entonnoir.

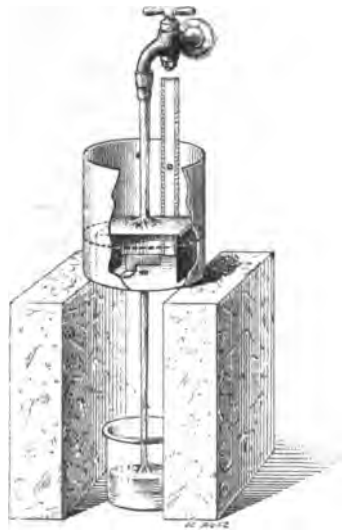
Mesurer avec une éprouvette graduée la quantité de sable écoulee par minute.

La formule $v = \sqrt{2gh}$ représente-t-elle les expériences? Les vitesses d'écoulement sont-elles modifiées si l'on répète l'expérience avec une bouteille dont on a détaché le fond?



32. Écoulement par un orifice en mince paroi. — *Montage.* — Percer un trou bien net ($d = 0^{\text{cm}}, 6$) au fond d'un vase métallique (boîte en fer-blanc, $h = d = 12^{\text{cm}}$) et souder une lame de zinc (5^{cm} ; 2^{cm} ; $0^{\text{cm}}, 05$) dans le fond du vase, au-dessus de l'ouverture, pour faire obstacle aux tourbillons. Plier une autre lame de zinc ($14^{\text{cm}} \times 8^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}}, 05$) de façon à faire une sorte de table que l'on placera au-dessus de l'ouverture.

Monter le vase ainsi préparé sur deux briques ($h = 20^{\text{cm}}$), et le placer sous un robinet muni d'un brise-jet, de manière que le jet du robinet vienne s'écraser contre la table de zinc.



Expériences. — Pour une ouverture déterminée du robinet, le

niveau de l'eau se fixe assez vite à une hauteur invariable. On mesure alors le débit, la hauteur de l'eau et le diamètre de la veine pris environ à 1^{cm} au-dessous de l'ouverture.

La formule $v = \sqrt{2gh}$ représente-t-elle la vitesse linéaire dans la veine? La contraction de la veine reste-t-elle constante quand on augmente le débit?

— Ayant ensuite rempli le seau, on le laissera se vider librement. Le temps qu'il met à se vider est-il égal à celui que l'on calcule en fonction des mesures précédentes?

Comparaison de deux liquides. — Prendre des volumes égaux d'eau et de mercure. Verser simultanément les deux liquides dans des entonnoirs de verre effilés aussi identiques que possible. Laisser ces entonnoirs se vider en empêchant les mouvements tourbillonnaires avec une carte que l'on tient dans le liquide. Les deux entonnoirs mettent-ils le même temps à se vider? S'il y a une différence, cette différence persiste-t-elle quand on permute les deux entonnoirs? (65).

33. Perte de charge dans un tuyau. — Placer un seau sur l'évier, sous le robinet largement ouvert, afin d'avoir un vase à niveau constant. Construire un siphon de verre ($3l = 100^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 7$), l'amorcer et le placer sur le bord du seau. Mesurer le débit et la section de la veine. On constatera qu'il y a une perte de charge dans le siphon, c'est-à-dire que la hauteur de chute est supérieure à $\frac{v^2}{2g}$.

34. Vase de Mariotte. — Disposer en vase de Mariotte un flacon tubulé en bas ($V = 2^l$), en fixant dans le goulot un tube droit ($l = 40^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 7$) et, dans la tubulure, un ajutage en verre ($d = 0^{\text{cm}}, 8$; $l = 8^{\text{cm}}$) brusquement rétréci à un diamètre de 2^{mm} ou 3^{mm} et usé bien droit sur un grès.

A l'aide d'une source de lumière éloignée et de petites dimensions, une lampe Nernst, par exemple, on projettera l'ombre du jet sur une feuille de papier fixée sur une planche à dessin que l'on amènera tout près de ce jet, et l'on tracera au crayon la position moyenne de l'ombre du jet. La trajectoire a-t-elle la forme d'une parabole? (II, 62).

35. Fontaine à deux liquides. — D'un flacon tubulé, faire jaillir un jet d'eau qui monte à une grande hauteur, en y versant du mercure par un tube à entonnoir et robinet (tube à brome).

— Obtenir aussi ce jet d'eau en refoulant dans le flacon de l'air

provenant d'un autre flacon tubulé dans lequel on verse de l'eau (8, 108, 109, 112).

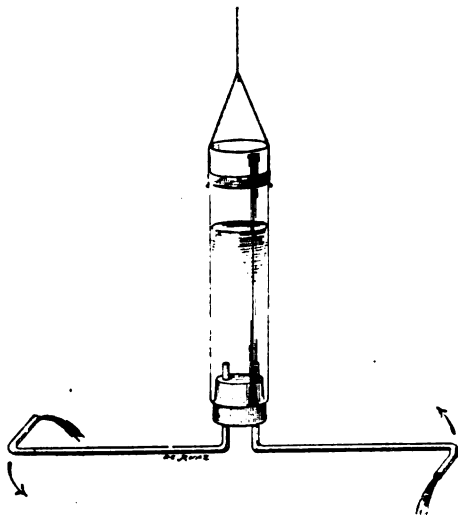


36. Tourniquet hydraulique. — Un tourniquet hydraulique peut être construit avec un verre de lampe fermé par un bouchon que traversent un ou deux tubes de verre convenablement recourbés ($D = 0^{\text{cm}}, 5$; $l = 30^{\text{cm}}$). A l'aide d'un fort bracelet de caoutchouc passé autour du verre de lampe (fragment de chambre à air de bicyclette) on suspendra l'appareil à un fil de soie *très fin* comme l'indique la figure de la page suivante.

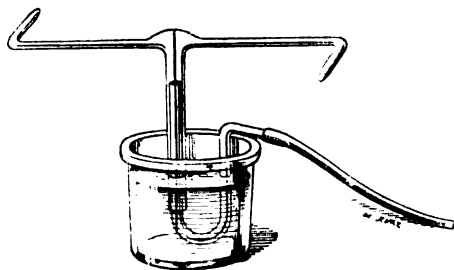
Cet appareil se mettra à tourner quand on l'alimentera d'eau (4, 66, 188).

37. Tourniquet à gaz. — Faire un tube en T en verre ($D = 1^{\text{cm}}$; $3l = 30^{\text{cm}}$). Étirer les bouts ($d = 0^{\text{cm}}, 2$) et les courber à angle droit, puis souffler un petit renflement en face du tube central. Recourber, d'autre part, un tube plus étroit ($d = 0^{\text{cm}}, 5$) en forme de \perp (longueur totale = 30^{cm}), et placer un morceau

d'aiguille à tricoter dans la grande branche. On fera reposer le tube en T sur la pointe de cette aiguille et l'on plongera le raccord dans un vase plein d'eau (77).



En envoyant par le tube en S un courant de gaz d'éclairage qu'on pourra allumer aux extrémités effilées du tube en T, celui-ci se mettra à tourner.

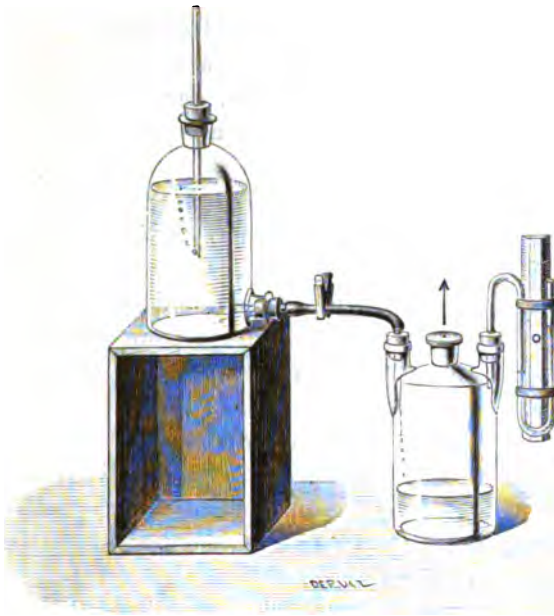


38. Écoulement d'un gaz par un orifice en mince paroi.

— *Montage.* — Graduer en quarts de litre un flacon tubulé en bas ($V = 1^l, 5$), en marquant les points de division avec un crayon à écrire sur le verre, et disposer ce flacon en vase de Mariotte. Adapter au tube d'écoulement ($l = 8^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 8$) un tube de caoutchouc ($l = 30^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 8$) fermé par une pince à ressort.

Préparer d'autre part un tube de verre étiré ($l = 8^{\text{cm}}$; $D = 0^{\text{cm}}, 8$; $d = 0^{\text{cm}}, 2$), et le fixer dans l'une des tubulures d'un flacon à deux tubulures ($V = 1^l, 5$). Dans l'autre tubulure, placer un tube en S

($d = 0^{\text{cm}}, 8$; $3l = 60^{\text{cm}}$; écartement = 3^{cm}) formant manomètre à eau et attacher un double décimètre entre ses branches par deux bracelets de caoutchouc.



Découper enfin une plaque de zinc ($D = 4^{\text{cm}}$; $e = 0^{\text{cm}}, 05$), percer au centre un trou de moins d'un millimètre, l'ébarber et l'écraser au marteau. Rouvrir ce trou avec une aiguille à coudre très fine (n° 10) et mesurer son diamètre en déterminant avec un palmer le diamètre de cette aiguille à l'endroit où elle s'ajuste exactement dans l'ouverture.

Expériences. — Fixer la plaque trouée sur le goulot du flacon tubulé, avec un peu de cire molle et relier ce flacon tubulé au vase de Mariotte placé sur un support ($h = 20^{\text{cm}}$). Régler la vitesse d'écoulement de l'eau de manière que l'excès de pression dans le flacon tubulé soit de quelques centimètres d'eau et mesurer la durée du passage de 250^{cm^3} d'air.

De la mesure du débit et du diamètre de l'ouverture, déduire la vitesse linéaire moyenne de l'écoulement du gaz. Construire de cette manière la courbe du débit en fonction de la pression et la comparer avec la courbe $v = \sqrt{\frac{2P}{d}}$.

Peut-on conclure de ces mesures que la veine gazeuse ne subit pas de contraction notable, comme le ferait une veine liquide?

Vérification d'un compteur à gaz. — Ayant établi par les expériences précédentes la légitimité de la formule de l'écoulement des gaz, on pourra utiliser l'appareil précédent pour le contrôle d'un compteur à gaz. On aura soin seulement de percer la plaque métallique d'un trou de grandeur telle, que la pression dans le flacon tubulé soit d'une vingtaine de centimètres d'eau quand on fait passer l'air avec la vitesse à mesurer.

39. Siphonner un gaz. — Dans la tubulure et le goulot d'un flacon tubulé ($V = 1^l, 5$), fixer des tubes de verre en U renversé ($d = 0^{\text{cm}}, 8$) débouchant l'un en haut et l'autre en bas du flacon.

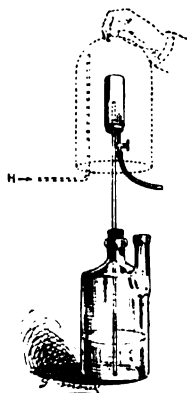


Faire passer un courant de gaz carbonique ou de gaz d'éclairage pour remplir le flacon et abandonner ce flacon à lui-même. Le flacon se videra de gaz et se remplira d'air.

On peut rendre les rentrées d'air très visibles en faisant la prise d'air dans un vase que l'on remplit de fumée en y plaçant deux morceaux de papier mouillés l'un d'acide chlorhydrique et l'autre d'ammoniaque (32, 107).

DIFFUSION DE L'HYDROGÈNE.

40. Fermer un petit vase poreux par un bouchon traversé par



deux tubes de verre. L'un d'eux, très court ($l = 5^{\text{cm}}; d = 0^{\text{cm}}, 7$), est adapté à un tube de caoutchouc pouvant être fermé par une pince à ressort, à défaut de robinet. L'autre, plus long, et qui supporte le vase poreux ($l = 50^{\text{cm}}; d = 0^{\text{cm}}, 7$), est fixé dans le goulot d'un flacon tubulé ($V = 375^{\text{cm}^3}$) et plonge dans de l'eau colorée par une trace de couleur d'aniline.

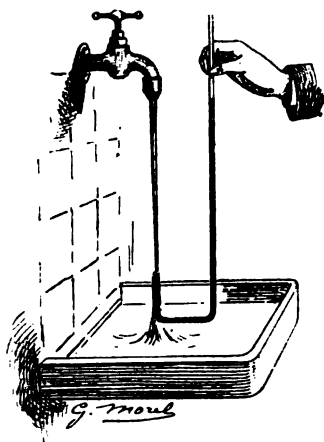
On montrera le passage rapide de l'hydrogène, et le passage lent de l'air à travers le vase poreux, soit en remplissant celui-ci d'hydrogène, ou de gaz d'éclairage, et en laissant cet hydrogène se diffuser dans l'atmosphère ambiante; soit, au contraire, en recou-

vrant le vase poreux plein d'air avec une petite cloche où l'on amène de l'hydrogène.

VITESSES ET PRESSIIONS DANS UNE VEINE LIQUIDE.

41. Forme de la veine. — Mettre un brise-jet sur un gros robinet à eau et régler le débit de manière à avoir une veine limpide aussi mince que possible. Placer une feuille de papier blanc derrière le filet d'eau et mesurer son diamètre de centimètre en centimètre, à partir de l'ouverture, en opérant avec deux doubles décimètres que l'on placera tout près de ce filet d'eau et sur lesquels on fera les mesures en appréciant les fractions de millimètre.

Construire la courbe des diamètres en fonction des hauteurs de chute comptées à partir de la toile métallique du brise-jet et comparer avec la courbe $hd^4 = \text{const.}$ — De la valeur de la section mesurée à environ 10^{cm} de l'ouverture, et de la mesure du débit, déduire aussi la vitesse linéaire de l'eau à ce niveau et la comparer avec la valeur $\sqrt{2gh}$. L'écart est-il dans les limites de l'incertitude des mesures ?



42. Vérification de la formule fondamentale

$$P - \frac{\rho^2}{3} = \text{const.}$$

— Introduire dans le jet la petite branche d'un tube en J (30^{cm} ;

A.


5^{cm}; 0^{cm},7). Jusqu'à quelle hauteur l'eau remonte-t-elle dans la grande branche lorsqu'on déplace le tube explorateur dans le jet? (156).

43. Perte de vitesse par le frottement. — Couper le jet, à différentes hauteurs au-dessus de l'ouverture du tube explorateur, avec une ou deux toiles métalliques (15 mailles au centimètre). À quelle hauteur l'eau remonte-t-elle alors dans ce tube?

44. Pulvérisateur. — Construire un *pulvérisateur* à l'aide de deux tubes de verre étirés ($l = 12^{\text{cm}}$; $D = 0^{\text{cm}},6$; $d = 0^{\text{cm}},3$)



que l'on fixe à angle droit dans un bouchon convenablement échancré, de manière que la pointe du tube aspirateur se trouve dans le jet d'air.

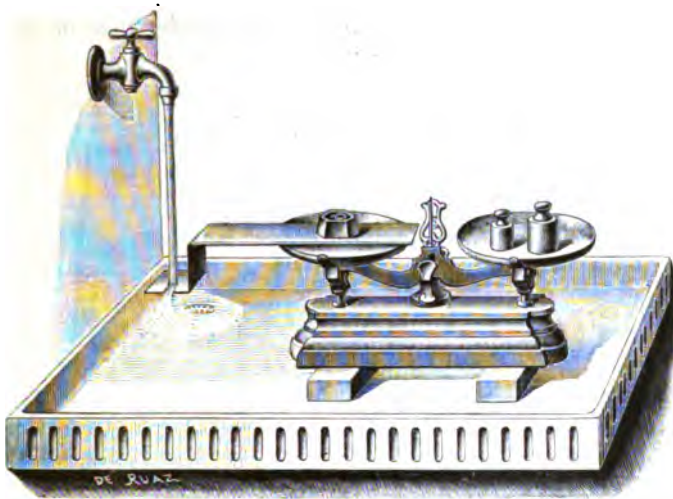
45. Choc d'un jet liquide et quantité de mouvement. — *Montage.* — Couper une feuille de tôle ou de toile métallique ($60^{\text{cm}} \times 3^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}},05$) et la plier en forme de  (40^{cm} ; 10^{cm} ; 10^{cm}). Placer cette lame en porte à faux sur l'un des plateaux d'une balance de Roberval (force = 2^{kg}) et la faire tenir, en la chargeant d'une masse de 500^g.

Mettre la balance ainsi disposée sur un support en briques installé sur l'évier, de manière que la plaque de tôle reçoive le jet du robinet que l'on aura muni d'un brise-jet.

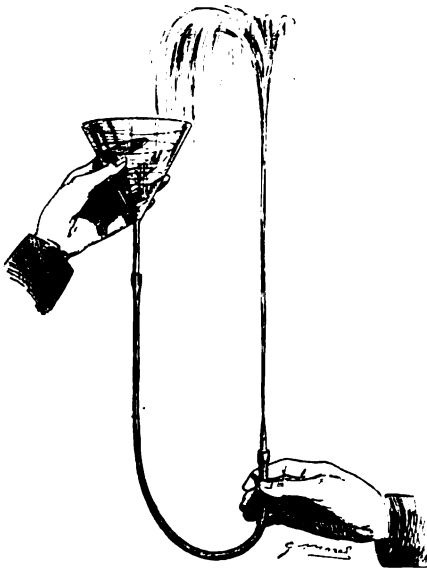
Expériences. — Équilibrer la balance; ouvrir franchement le robinet et mesurer l'effort exercé par le jet sur la plaque de tôle. Avec un double décimètre placé horizontalement près du jet, mesurer le diamètre de ce jet au moment où il va se briser, puis retirer la balance et déterminer le débit du robinet en mesurant le temps nécessaire pour remplir un seau d'une capacité connue.

Calculer le produit de la masse d'eau débitée à la seconde par sa

vitesse linéaire (quantité de mouvement) et comparer ce produit avec l'effort exercé par le jet.



46. Béliet hydraulique et jet d'eau. -- Adapter à un

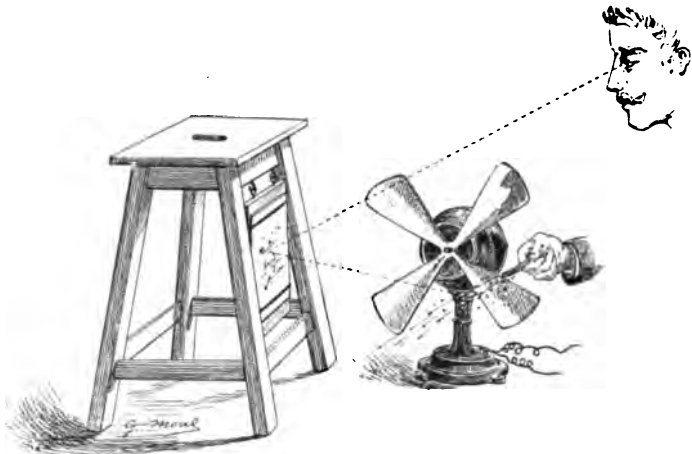


entonnoir de verre un caoutchouc ($l = 60^{\text{cm}}$) et un tube de verre étiré et disposer le tout pour produire un jet d'eau. Si l'on remplit

l'entonnoir d'eau en pinçant le caoutchouc de manière que le tube reste plein d'air; et si, brusquement, on livre passage à l'air et à l'eau qui le suit, le jet remonte, tout d'abord, à une hauteur bien supérieure au niveau de l'eau dans l'entonnoir, mais il se fixe ensuite à un niveau un peu inférieur (64).

ÉTUDE D'UN COURANT D'AIR.

47. Répartition des vitesses. — *Montage.* — Placer un ventilateur électrique sur le bord d'une table et y placer aussi un tabouret ($h = 55\text{cm}$), sous lequel une planchette de bois



($20\text{cm} \times 12\text{cm} \times 1\text{cm}$, 8) est suspendue par des pitons. Fixer un miroir plan ($12\text{cm} \times 12\text{cm}$) sur la planchette, avec deux bracelets de caoutchouc, et orienter l'axe d'oscillation du miroir parallèlement à l'axe de rotation du ventilateur.

Lignes de flux. — Explorer le courant d'air à l'aide d'un ruban très souple (*faveur*; $l = 5\text{cm}$) fixé à un fil de fer ($l = 20\text{cm}$) et chercher la direction de la vitesse en différents points d'un plan méridien dans le voisinage du ventilateur. On reportera les indications obtenues sur un dessin (échelle $\frac{1}{5}$) et l'on tracera les lignes de flux.

Vitesse. — Préparer une torche en chiffons ($l = 15\text{cm}$; $d = 2\text{cm}$), l'allumer, puis l'éteindre de manière à conserver une extrémité incandescente. Un aide approche lentement la torche du ventilateur, et les ailettes en détachent des parcelles incandescentes. Chacune de ces parcelles semble tracer un trait de feu et l'on en

regarde l'image dans le miroir mobile. On fait osciller ce miroir et l'on règle l'amplitude de l'oscillation, ou l'éloignement du miroir, de manière que l'image du trait de feu paraisse inclinée à 45 degrés. Mesurant alors la période d'oscillation du miroir et la distance à la trajectoire des particules incandescentes, on pourra calculer la vitesse linéaire de ces particules.

— On cherchera dans le courant d'air la région de vitesse maxima et l'on étudiera les variations de cette vitesse en fonction de la vitesse de rotation du moteur.

48. Résistance de l'air. — *Expériences qualitatives :* Expérience du tube de Newton : Tube de verre ($D = 3^{\text{cm}}$; $e = 0^{\text{cm}}$, 2) fermé par des bouchons et dans lequel on fait le vide avec la trompe à eau. — Ballon contenant des objets légers et abandonné à lui-même. — Pièce de monnaie et rondelle de papier qu'on laisse tomber ensemble, en les superposant ou non. — Feuilles de papier identiques dont l'une est roulée en boule et qu'on laisse tomber ensemble (2, 35).

49. Existence d'une vitesse limite. — *Expériences qualitatives.* — Gonfler une bulle de savon avec du gaz d'éclairage et la laisser monter : son mouvement devient bientôt uniforme, avec un balancement périodique.

On produit un phénomène absolument semblable en laissant tomber des gouttes d'eau dans une éprouvette ou dans un tube de verre plein de pétrole. La chute est très lente, en raison de la presque égalité des densités; et les gouttes qui s'écrasent sous l'action de la résistance du liquide ambiant tombent bientôt en mouvement uniforme avec un balancement périodique (8, 87).

Mesure de la vitesse limite. — Laisser tomber un ballon sphérique en celluloid (jouet) sur le sol en mesurant la hauteur de chute et la hauteur à laquelle le ballon rebondit. Faire croître d'abord la hauteur de chute jusqu'à 1^{m} ou 2^{m} , puis augmenter beaucoup cette hauteur en s'élevant progressivement dans un escalier. On constatera que l'on obtient très rapidement une limite pour la hauteur à laquelle le ballon rebondit — et par conséquent aussi pour la vitesse même de ce mobile.

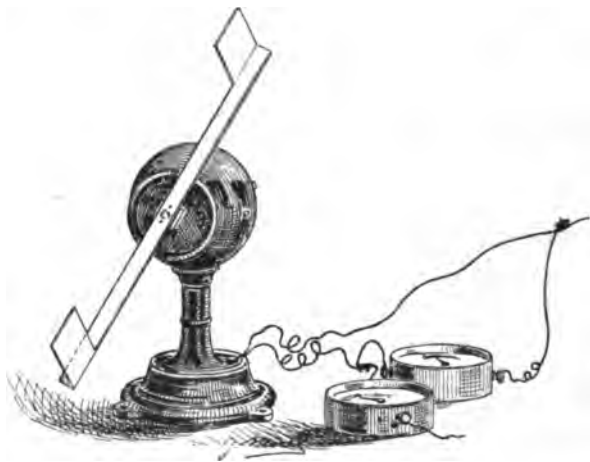
On calculera cette vitesse limite en négligeant la résistance de l'air pendant que le ballon remonte. Y a-t-il lieu de faire une correction pour tenir compte de cette résistance, supposée proportionnelle au carré de la vitesse? (87).

-- Étudier aussi la vitesse de chute d'un parachute (jouet) en fonction de la charge.

50. Mesure de la résistance de l'air. — *Montage.* — Découper une lame de zinc ($40^{\text{cm}} \times 2^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}},1$) aux deux extrémités de laquelle on ménagera des ailettes carrées ($5^{\text{cm}} \times 5^{\text{cm}}$) parallèles à la longueur, placées symétriquement par rapport au centre et qu'on repliera à angle droit du plan de la lame.

Fixer cette lame sur l'arbre d'un moteur électrique de ventilateur de manière qu'elle tourne dans son plan autour de son centre, les ailettes frappant l'air normalement. On pourra, par exemple, clouer cette lame de zinc sur une planchette ($3^{\text{cm}}; 3^{\text{cm}}; 2^{\text{cm}}$) percée d'un trou dans lequel l'arbre entrera à frottement dur.

Expériences. -- Faire tourner le moteur à différentes vitesses



que l'on relèvera avec un compteur de tours et une montre à secondes. Pour chaque vitesse on déterminera la force électromotrice aux bornes et l'intensité du courant.

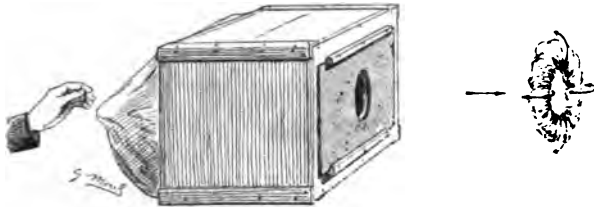
Si l'on a affaire à un moteur *serie*, on déterminera ensuite la force électromotrice aux bornes sous les différentes intensités quand le moteur est maintenu immobile, et l'énergie absorbée aux différentes vitesses quand le moteur marche à vide. On déduira de ces mesures l'énergie réellement utilisée par le moteur pour vaincre la résistance de l'air sur les ailettes, et l'on construira la courbe de cette résistance en fonction de la vitesse.

-- On fera des mesures analogues avec le ventilateur à hélice.

-- On étudiera aussi l'effort exercé sur le plateau d'une balance de Roberval par le courant d'air que fournit le ventilateur.

MOUVEMENTS TOURBILLONNAIRES DES FLUIDES.

51. Tourbillons de fumée. — Faire une caisse en bois ($40^{\text{cm}} \times 40^{\text{cm}} \times 40^{\text{cm}}$), dans l'une des faces de laquelle on ménage une ouverture ($20^{\text{cm}}, 20^{\text{cm}}$) pouvant être fermée par une plaque de



zinc passant dans une glissière. Cette plaque de zinc est percée elle-même d'un trou rond à bords bien nets ($d = 15^{\text{cm}}$). La face opposée est remplacée par un morceau de calicot cloué tout autour et formant une poche, qui pourra être tirée en arrière d'une dizaine de centimètres. Fixer enfin quelques pitons à l'intérieur de la boîte, et y suspendre des chiffons mouillés les uns avec de l'ammoniaque, les autres avec de l'acide chlorhydrique.

Pour produire les anneaux tourbillonnaires, on tire doucement la poche en arrière, puis on la projette en avant d'un coup sec : le tourbillon obtenu progresse sur un espace de plusieurs mètres.

On observera ces anneaux tourbillonnaires sur un fond obscur, avec un éclairage oblique. On étudiera notamment le mouvement de deux anneaux qu'on projette l'un dans l'autre. — En répétant l'expérience avec une ouverture ovale ($D = 2d = 20^{\text{cm}}$), on pourra observer les déformations périodiques que subit le tourbillon pendant qu'il avance (20, 184).

52. Tourbillons de l'hydrogène phosphoré. — Si l'on met du phosphore de calcium dans un vase plein d'eau dont la surface est couverte d'une bonne couche de sciure de bois, les bulles de gaz qui se dégagent sont assez grosses, et elles s'enflamment à la surface en produisant de belles couronnes de fumée (87).

53. Anneaux tourbillonnaires liquides. — Avec un compte-goutte ou une pipette, verser des gouttes d'encre dans un

vase de verre plein d'eau. En laissant tomber les gouttes d'une hauteur de quelques centimètres, convenablement choisie, on



verra se former des anneaux tourbillonnaires semblables aux tourbillons de fumée (20).

TENSION SUPERFICIELLE.

54. Tourbillons du camphre. — Poser un vase large ($D = 25^{\text{cm}}$) sous un robinet d'eau ouvert, de manière que l'eau déborde pendant quelque temps tout autour du vase. Si l'on saupoudre la surface de l'eau avec de la poussière de camphre qu'on écrase entre les doigts on observe des mouvements tourbillonnaires très rapides des fragments de camphre.

Les mouvements du camphre sont-ils altérés et de la même manière si l'on dépose à la surface de l'eau une goutte d'une huile minérale, une goutte d'essence de térébenthine, ou une goutte d'huile d'olive?

— Chercher les dimensions de la plus petite gouttelette d'essence de térébenthine qui arrête les tourbillons du camphre. On se servira pour cela d'une pipette faite d'un tube de verre étiré en une pointe presque microscopique où l'on fera perler une gouttelette d'essence.

Quelle limite supérieure des dimensions d'une molécule peut-on déduire de cette expérience? (163).

— Fixer avec de la cire molle un fragment de camphre ($0^{\text{e}}, 1$) à l'extrémité, et sur le côté d'un bouchon ou d'une tige de bois (morceau de règle) que l'on fait flotter sur l'eau et observer les mouvements de ce flotteur.

55. Égalité de tension en tous sens. — Nouer en boucle un fil de soie très fin (quintuple zéro) ($l = 25^{\text{cm}}$) et le *vaseliner* pour qu'il puisse flotter sur l'eau. Placer ce fil sur une surface d'eau très propre et constater tout d'abord son équilibre indiffé-

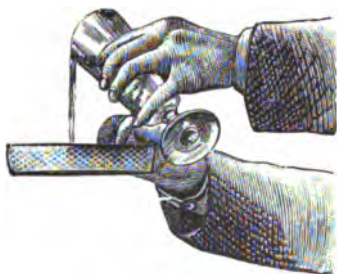


rent. Si l'on dépose alors des grains de camphre ou une gouttelle d'essence de térébenthine dans la boucle, on la voit s'ouvrir suivant une circonférence.

56. Ménisques convexes. — Plier un carré de toile métallique ($15^{\text{cm}} \times 15^{\text{cm}}$) de 10 mailles au centimètre, de manière à former une boîte profonde de 5^{cm} , la flamber, puis la tremper dans de la paraffine chaude et l'égoutter.

Cette boîte flotte sur l'eau et peut porter des charges de plus de 20^{g} ; mais on la fait immédiatement couler en y versant soit quelques grammes d'eau, soit une goutte d'essence de térébenthine, soit même de la *vapeur* d'éther.

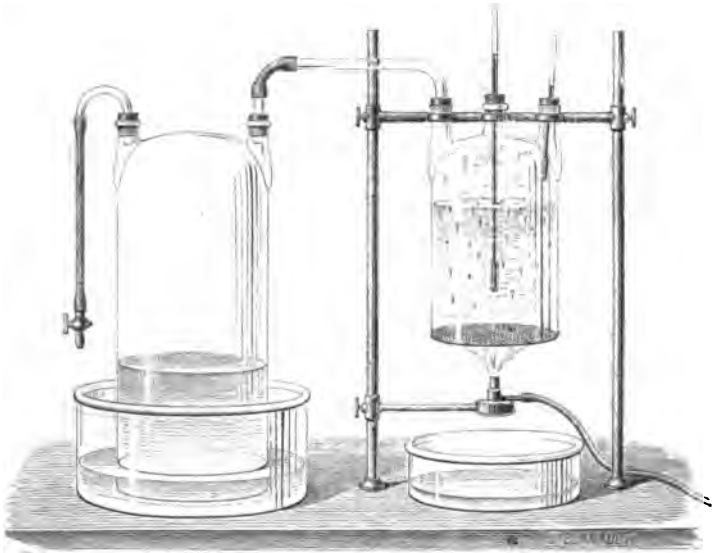
— On pourra faire aussi la même expérience en sens inverse, c'est-à-dire que l'on pourra verser un verre d'eau dans cette boîte tenue à la main, mais il faudra avoir soin de briser le jet avec un morceau de papier qu'on mettra au fond de la boîte pour le remplissage et que l'on retirera ensuite (64, 163).



57. Influence de la température. — Introduire une colonne d'eau ($l = 10^{\text{cm}}$) dans un tube de verre ($l = 50^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 5$). Placer le tube horizontalement, chauffer l'un des ménisques et constater le recul de l'index (22).

58. Faire flotter sur l'eau des objets plus denses que l'eau. — Faire une boussole avec une aiguille à coudre aimantée qu'on dépose sur l'eau après l'avoir légèrement *vaselinée*. — Observer les déplacements relatifs de menus objets flottant sur l'eau et qui sont ou non mouillés par l'eau; et notamment les attractions ou répulsions apparentes par le bord du vase, selon que les ménisques sont concaves ou convexes (68).

59. Viscosité superficielle des liquides. — Mettre du mercure propre dans une éprouvette; saupoudrer la surface avec du sable et enfoncer une baguette de verre ($D = 1^{\text{cm}}$) dans le mercure : le sable suit le mouvement de la baguette. — Faire une expérience analogue avec une surface d'eau saupoudrée de poudre de lycopode et une baguette de verre vaselinée.



— Monter et descendre une bande de papier dans un cristalliseur plein d'eau à la surface de laquelle on a mis une goutte d'huile; le contour de la goutte paraît être entraîné à distance par la bande de papier.

Ces expériences donnent-elles les mêmes résultats quand on opère très lentement? (66).

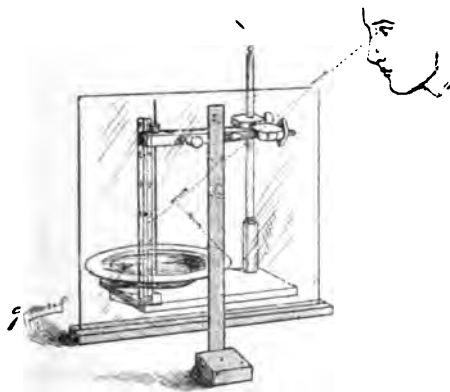
60. Suspension et ébullition de l'eau sur un tulle. — Prendre une cloche à douille de 10^{cm} à 15^{cm} de diamètre, fixer sur l'ouverture un morceau de tulle ayant des mailles de 0^{cm},1, et faire communiquer cette cloche par un tube un peu large avec une cloche à douille plus grande munie d'un robinet.

Les deux cloches reposent sur des cuves pleines d'eau; on fait monter l'eau par aspiration à peu près à la moitié de la hauteur des cloches, et l'on retire la cuve de la cloche garnie de tulle. En plaçant sous cette cloche un bec de gaz dont la flamme couvre toute la surface du tulle, on pourra échauffer l'eau et produire une ébullition tranquille sans que le liquide cesse d'être maintenu par le tulle.

Pour faire persister indéfiniment l'ébullition, on doit maintenir l'eau au même niveau dans la cloche; il suffit pour cela d'en injecter de temps en temps à travers le tulle au moyen d'une pipette courbe (130).

ASCENSIONS ET DÉPRESSIONS.

61. Ascensions dans les tubes capillaires. — Vaseliner le bord d'une assiette et y verser assez d'eau pour avoir un ménisque convexe. Laver abondamment des tubes de verre



($l = 20^{\text{cm}}$; diamètre intérieur de 0^{cm},05 à 0^{cm},5) et mettre l'un de ces tubes dans l'eau. Disposer en avant du tube une glace sans

tain verticale et un double décimètre qui sera placé de manière que son image par réflexion vienne se former le long du tube.

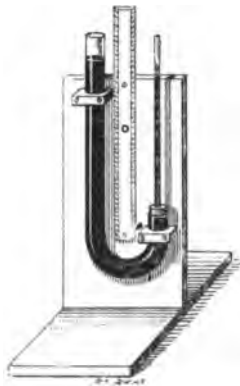
Au moment de mesurer la hauteur d'eau soulevée, on inclinera d'abord le tube pour bien le mouiller et l'on visera le ménisque; on déplacera ensuite ce tube pour pouvoir viser la surface libre.

Pour mesurer les diamètres de tubes supérieurs à $0^{\text{cm}}, 2$, on se servira du double décimètre, en appréciant les dixièmes de millimètre.

Pour les tubes plus fins, si l'on ne dispose pas d'un microscope avec micromètre oculaire, on aspirera dans le tube une colonne de mercure ($l = 15^{\text{cm}}$) dont on mesurera la longueur avec le double décimètre et l'on versera ce mercure dans un godet taré. On répétera cette manipulation plusieurs fois pour augmenter la masse à peser, et l'on déduira le diamètre moyen du tube de l'augmentation de poids du godet.

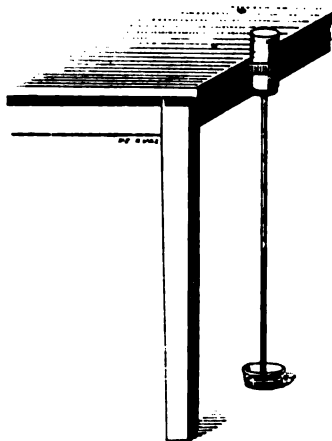
On construira la courbe des ascensions en fonction des diamètres, et on la comparera avec celle que donnerait la loi de l'inverse du diamètre. Quelle valeur de la tension superficielle de l'eau peut-on déduire de la moyenne de ces mesures?

62. Dépressions dans les tubes capillaires. — Ajuster un tube étroit à l'extrémité de la petite branche d'un tube en J ($l = 20^{\text{cm}}$ et 5^{cm} ; $d = 1^{\text{cm}}, 5$) fixé contre une planchette verticale



portant un double décimètre. Verser du mercure par la grande branche, et mesurer la dénivellation en reportant les niveaux sur le double décimètre avec une équerre. La loi des diamètres se trouve-t-elle vérifiée?

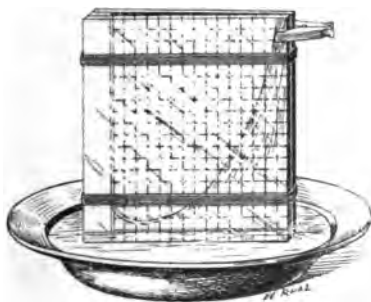
63. Grandeur des forces capillaires. — A l'entrée d'un petit vase poreux, fixer un bouchon traversé par un tube de verre ($l = 80^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 3$) et mastiquer les joints. Remplir le tout



avec de l'eau et retourner l'appareil sur une petite cuve à mercure.

Au bout d'un temps suffisant, l'eau disparaissant par évaporation, le mercure monte dans le tube, et la tension superficielle finit par soutenir une colonne de mercure atteignant presque la hauteur du baromètre (156).

64. Ascension capillaire entre deux lames. — *Montage.* — Découper deux lames de glace, ou même de verre



($12^{\text{cm}} \times 12^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}}, 25$), les savonner énergiquement avec une brosse à ongle et rincer à l'eau. Attacher ensemble ces deux lames au moyen de deux bracelets de caoutchouc, en interposant le long d'un bord une cale de verre (12^{cm} ; 1^{cm} ; $0^{\text{cm}}, 25$) de manière à

former un dièdre. Glisser un morceau de papier quadrillé en millimètres sous les bracelets de caoutchouc, derrière les lames, et assurer le serrage à l'aide d'une pince à ressort placée en haut de l'arête du dièdre.

Expériences. — Graisser le bord d'une assiette avec de la vaseline et la remplir d'eau, de manière à obtenir un ménisque convexe. Mettre la double lame dans l'eau en l'inclinant fortement pour bien la mouiller, puis la redresser verticalement. Placer les traits du papier quadrillé verticalement et lire une série de hauteurs du ménisque sur des ordonnées distantes de $0^{\text{cm}},5$ à partir du bord de la cale de verre. — Pour relever le niveau de la surface libre, on mettra un peu de vaseline contre une des lames, de manière à faire descendre le ménisque et à permettre la visée.

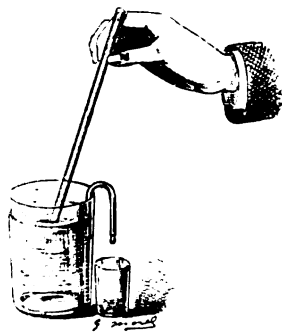
Reporter sur un autre papier quadrillé les mesures que l'on vient de faire, et reproduire la courbe dessinée par le ménisque. Tracer les asymptotes horizontale et verticale de la courbe et relever les valeurs du produit xy , de centimètre en centimètre. Les variations de ce produit restent-elles dans les limites de l'incertitude des mesures?

De la valeur moyenne de ce produit et de la mesure de l'épaisseur de la cale on déduira la valeur de la tension superficielle de l'eau.

FORMATION DES GOUTTES.

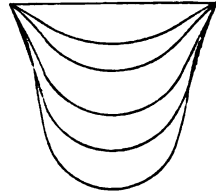
65. Mesure de la tension superficielle. — Faire deux siphons en verre ($d = 0^{\text{cm}},4$ et $0^{\text{cm}},8$; $L = 10^{\text{cm}}$; $l = 5^{\text{cm}}$) dont on étirera la grande branche en réduisant son diamètre à $0^{\text{cm}},2$ sur une longueur de 5^{cm} , tandis que la petite branche sera coupée à bords nets.

Forme des gouttes. — Amorcer l'un des siphons, le poser sur le bord d'un gobelet plein d'eau et faire écouler les gouttes sous une pression excessivement faible, en réglant cette pression au moyen d'une baguette de verre que l'on enfoncera plus ou moins dans l'eau. Observer et dessiner les formes successives de la goutte; sont-elles toujours stables?

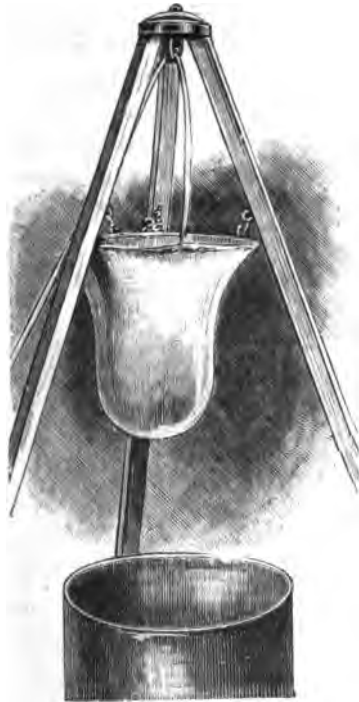


Poids des gouttes. — Déterminer le poids de 100 gouttes que l'on recevra dans un verre et en déduire la valeur de la tension superficielle. Changer ensuite de siphon et s'assurer que le poids des gouttes est proportionnel au diamètre du tube.

On pourra constater la diminution du poids des gouttes quand on verse de la vapeur d'éther sur les gouttes en formation (41).



66. Imitation de la tension superficielle : membrane de caoutchouc. — Entre deux cerceaux d'enfant ($D = 50^{\text{cm}}$) placer une feuille de caoutchouc ($e = 0^{\text{cm}}, 05$) à peine tendue; visser



les deux cerceaux l'un contre l'autre ou bien les serrer fortement avec des pinces à charbon de piles. Suspending ensuite le tout à 1^m, 20 au-dessus du sol, à l'intérieur d'un grand trépied ou d'une échelle double, en ayant soin de placer un seau vide en dessous.

Verser *progressivement* plusieurs litres d'eau dans la poche de

caoutchouc en observant les formes successives de la goutte jusqu'à la forme instable.

Lorsque la goutte est *tombée*, siphonner l'eau le plus tôt possible pour éviter l'altération du caoutchouc (163, 184).

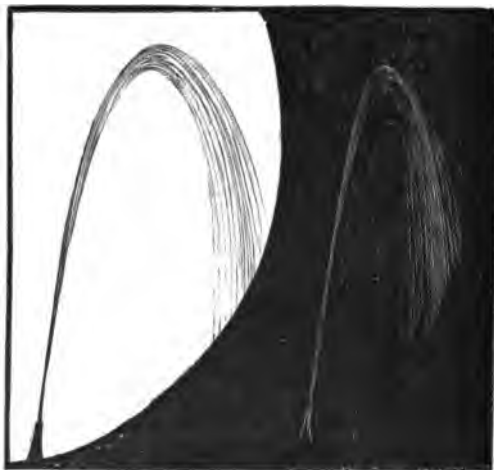
67. Liquides de densités voisines. — Préparer un mélange d'eau et d'alcool (eau 50^g, alcool 100^g) à peine plus léger que l'huile d'olive. — Avec une pipette dont la pointe pénètre dans le liquide, verser lentement de l'huile à la surface de l'eau alcoolisée; il se forme de grosses gouttes dont on peut aisément observer et dessiner les formes (153).

68. Compte-gouttes. — Faire un *compte-gouttes* en étirant la pointe d'une pipette ($V = 5\text{cm}^3$) en un tube étroit ($l = 3\text{cm}$; $d = 0\text{cm}, 1$; $e = 0\text{cm}, 1$) et jauger cette pipette (II, 17).

Remplir successivement la pipette de différentes solutions titrées d'alcool et construire la courbe représentant le nombre de gouttes que fournit la pipette en fonction de la concentration.

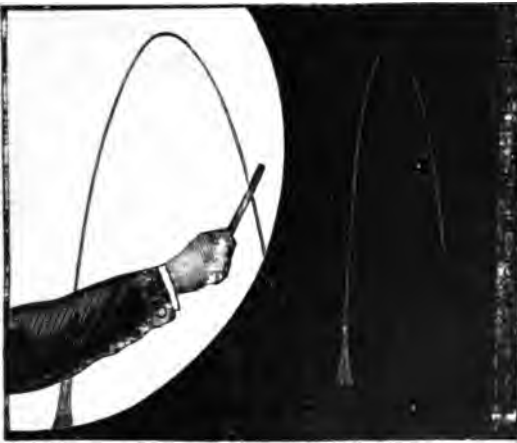
Appliquer ensuite le procédé du compte-gouttes au titrage d'un alcool du commerce. On constatera l'influence que peuvent avoir certaines impuretés et, notamment, l'effet produit par la présence d'une petite quantité d'alcool amylique (46, 112).

69. Décomposition d'une veine liquide en gouttes. —

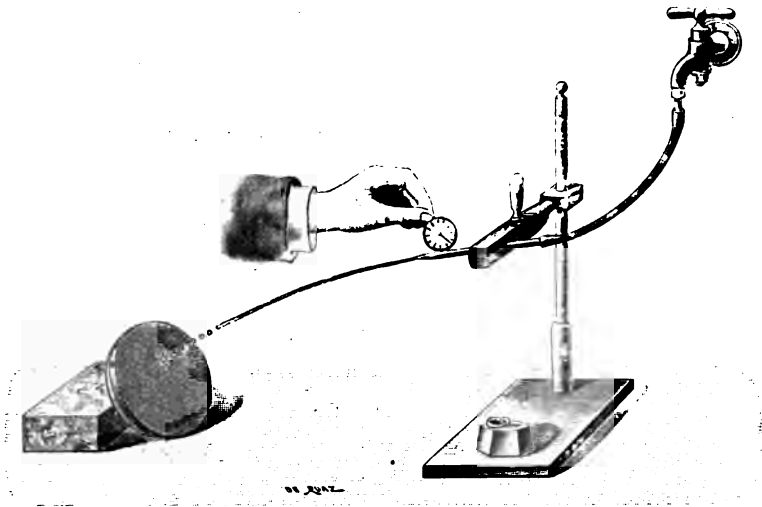


Rôle de la tension superficielle. — Préparer un tube de verre ($l = 10\text{cm}$, $D = 1\text{cm}$) étiré, de manière à avoir une ouverture d'un

diamètre aussi voisin que possible de $0^{\text{m}},2$, le relier au robinet d'eau par un tube de caoutchouc, et produire un jet d'eau presque vertical d'environ 1^{m} de hauteur.



On constatera la disparition presque complète des gouttelettes et le rassemblement du jet en grosses gouttes, quand, par un



procédé quelconque, on diminuera la tension superficielle. On obtiendra ce résultat, soit en approchant un bâton de cire électrisé, soit en faisant passer le jet dans la flamme très fuligineuse

A.

11

que donne un tampon d'ouate imbibée de benzine, d'essence minérale ou d'essence de térébenthine, soit encore en versant de la vapeur d'éther sur le jet (163).

70. Microphone hydraulique. — Envoyer directement le jet d'eau sur une feuille de papier tendue ou sur la membrane d'un tambourin, placée à environ 40^{cm}, comme le représente la figure de la page précédente. Régler le débit de manière que la membrane coupe le jet à l'extrémité de la partie transparente, c'est-à-dire à l'endroit où vont se former les gouttes.

Si l'on appuie sur le tube de verre un corps quelconque, une planchette de bois par exemple, on entendra se produire un son intense, à l'unisson du son que produiraient les vibrations propres de ce corps (?). En mettant en contact avec le tube une montre en marche ou la caisse de résonance d'un diapason en vibration, on observera un renforcement énergique des sons transmis par le jet d'eau à la membrane (163).

71. Observation stroboscopique. — Monter un disque à trous sur l'axe d'un moteur de ventilateur, comme pour la construction d'une sirène (V, 32), mais peindre en noir la face du disque qui sera tournée vers l'observateur.

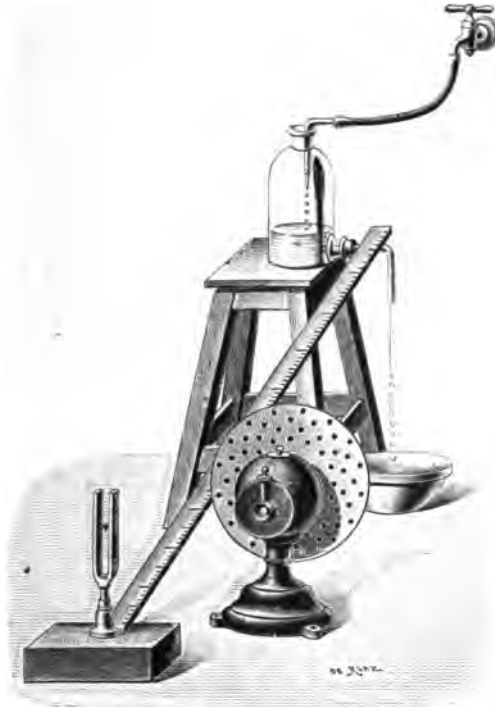
Produire une veine liquide tombant verticalement à l'extrémité d'un tube étiré ($d = 0^{\text{cm}},2$) que l'on aura fixé au robinet d'eau. On règle le débit de manière que la veine continue ait une longueur d'environ 20^{cm}.

Ce réglage est facilité si l'on alimente la veine au moyen d'un vase à niveau constant ou, comme le représente la figure ci-contre, au moyen d'un flacon tubulé en bas ($V = 1^1,5$) d'où l'écoulement se fait sous une pression de 20^{cm} à 30^{cm}.

Provoquer la formation périodique des gouttes en appuyant sur l'ajutage la queue d'un diapason ($ut_3 = 256$ v. d.), ou même en transmettant les vibrations à cet ajutage au moyen d'une règle s'appuyant sur la caisse de résonance du diapason, et observer la veine à travers les trous de la sirène en mouvement.

On réglera le rhéostat du moteur de manière que le passage de l'une des séries de trous arrive à être synchrone des vibrations du diapason. On y arrivera rapidement en mettant à l'unisson du diapason le son que l'on obtient en soufflant sur les trous qui défilent, et ce réglage sera achevé et maintenu en agissant directement avec la main sur l'axe du moteur.

Le synchronisme étant obtenu, observer le jet liquide et constater son immobilité apparente. On étudiera et l'on dessinera la constitution du jet. On reconnaîtra notamment le mode de formation des gouttes, l'existence des gouttelettes intermédiaires et les vibrations des gouttes pendant leur chute.

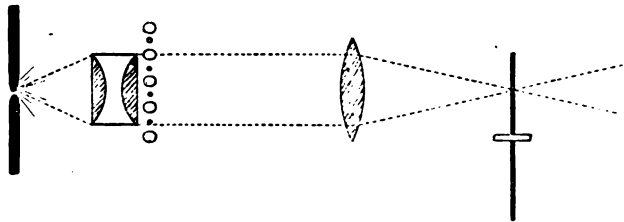


On pourra répéter l'expérience sur un jet montant presque verticalement. En étudiant alors la formation des gouttes, on reconnaîtra que le dédoublement du jet qui se produit parfois pour une vitesse convenable du jet est dû à la séparation des gouttes principales et des gouttelettes qui se forment régulièrement entre elles.

— Toutes ces observations stroboscopiques peuvent se faire avec un synchronisme parfait, sans réglage, en provoquant la rupture du jet par les vibrations du trembleur d'une bobine de Ruhmkorff et en éclairant le jet soit avec l'étincelle condensée de la bobine, soit avec un tube de Geissler actionné par cette bobine (77, 149).

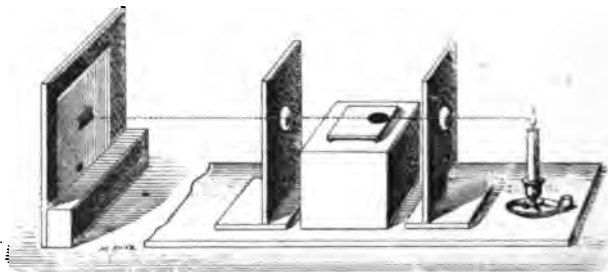
— Pour une expérience de projection, on fera se former le

gouttes devant le condenseur de la lanterne de projection, dans un faisceau lumineux à peu près cylindrique, et l'on en projettera l'image sur l'écran. Le disque interrupteur sera placé de manière



que ses ouvertures défilent au point où se forme l'image réelle du point lumineux de la lanterne.

72. Tension superficielle du mercure, méthode de la large goutte. — Fixer une plaque de verre (10^{cm} , 10^{cm}) sur un support horizontal avec de la cire molle. Y verser une gouttelette de mercure avec un tube effilé, et s'en servir pour régler exactement l'horizontalité de cette plaque.



Éclairer vivement la goutte de mercure par derrière au moyen d'une lentille ayant une flamme au voisinage de son foyer, et projeter l'image de cette goutte de mercure sur une feuille de papier fixée contre le mur, en se servant d'une seconde lentille ($G = 10$).

Ajouter progressivement du mercure dans la goutte, et étudier sa déformation et les variations de l'angle de raccordement, en suivant au crayon les contours de l'image directe et de l'image réfléchi par la lame de verre sur laquelle la goutte est posée.

On déterminera le grossissement en remplaçant la goutte de mercure par une carte percée de deux trous d'épingle à distance connue. Se reportant ensuite aux dessins qui représentent les gouttes les plus larges, on mesurera la distance verticale de

l'équateur de la goutte à son sommet et l'on déduira de ces mesures la valeur de la tension superficielle du mercure.

73. Liquides d'égale densité. — Préparer un mélange d'eau et d'alcool (500^g eau pour 1000^g d'alcool) à peine plus léger que l'huile d'olive, et en verser la moitié dans une conserve ($V = 2^l$). Ajouter ensuite à l'autre moitié juste assez d'eau pour la rendre plus dense que l'huile et verser ce nouveau mélange au fond du vase à l'aide d'un tube à entonnoir.

Entre ces deux couches de liquide on peut faire tenir en équilibre une grosse sphère d'huile que l'on forme très lentement avec une pipette. On rassemble les gouttelettes éparses avec un anneau de fil de cuivre ($D = 2^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}$, 1).

Prendre la bulle entre deux anneaux verticaux parallèles et observer les formes qu'elle prend quand on l'étire horizontalement. On opérera avec des gouttes de plus en plus grosses, et, les étirant avec les mêmes anneaux, on cherchera le plus long cylindre que l'on puisse former entre ces anneaux sans que ce cylindre se décompose en deux masses attachées séparément à chacun des anneaux.



— On obtient d'assez bons résultats avec du sulfure de carbone, teinté d'iode, qu'on met en suspension entre deux solutions contenant respectivement 45 et 35 pour 100 de sulfate de zinc cristallisé. Mais la surface de la goutte ne tarde pas à s'altérer et se recouvre d'un enduit solide (?) qui semble n'avoir plus de tension superficielle et qui conserve toutes les formes qu'on veut lui donner.

74. Membranes d'huile dans l'eau. — Verser quelques gouttes d'huile à la surface de l'eau alcoolisée, enfoncer un anneau dans l'eau à travers cette huile et observer la formation d'une membrane d'huile dans



l'eau. En déplaçant un peu brusquement l'anneau dans l'eau, on peut gonfler cette membrane et même en détacher une bulle d'eau à parois d'huile (108, 150, 184).

LAMES MINCES.

75. Eau de savon. — *Liquide glycérique de Terquem.* — Saturer de l'alcool à 80° ($D = 0,865$) avec des copeaux desséchés de savon blanc (74^{gr}, 2 de savon par litre). Mélanger, d'autre part, à volumes égaux, de l'eau et de la glycérine. A 100^{cm³} de ce dernier mélange, ajouter 25^{cm³} de la solution de savon; chasser l'alcool par une ébullition prolongée; puis, après refroidissement, ramener le liquide à 100^{cm³} par addition d'eau et filtrer au coton.

Recette simplifiée.

Eau	100 ^{gr}
Savon.....	10 ^{gr}
Sucre blanc.....	400 ^{gr}

Ces deux liquides sont très fermentescibles; on favorisera leur conservation par l'addition de quelques gouttes de *formol*.

Liquide résineux. — Pulvériser ensemble

Colophane pure.....	100 ^{gr}
Carbonate de potassium.....	100 ^{gr}

ajouter un litre d'eau et faire bouillir jusqu'à dissolution complète. La solution assez épaisse que l'on obtient se conserve indéfiniment; on l'étend de 4 à 5 fois son volume d'eau pour s'en servir (77).

76. Tension superficielle. — Former une lame mince d'eau de savon dans un anneau plan en fil de cuivre de 0^{cm}, 1 récemment flambé ($D = 10^{\text{cm}}$). On se rendra compte de la faible épaisseur de



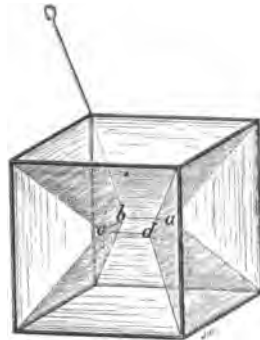
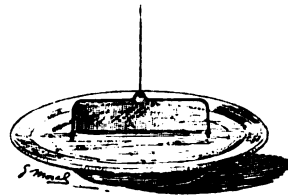
cette lame par l'observation des franges d'interférence, qui seront horizontales si l'on place la membrane verticalement (VI, 134).

On constatera que cette membrane peut soutenir de petits grains

de plomb; mais que des grains plus gros la traversent, et que la membrane se reforme derrière eux.

On placera ensuite sur cette lame mince une boucle en fil de soie très fin ($d = 5^{\text{cm}}$, n° 00000) humecté du liquide savonneux. On percera la lame à l'intérieur de la boucle, avec un morceau de papier buvard, et l'on verra la boucle prendre de suite la forme d'un anneau circulaire. — L'expérience est plus facile à réaliser en fixant par ses deux bouts, en travers de l'anneau, un fil un peu lâche qui se tend en arc de circonférence quand on perce une des moitiés de la lame.

77. Mesure de la tension superficielle. — Courber un fil métallique fin ($d = 0^{\text{cm}}$, 05) en U renversé ($l = 15^{\text{cm}}$; $h = 1^{\text{cm}}$, 5); le suspendre par le milieu à une balance pesant au centigramme, et placer en dessous une assiette remplie d'eau de savon de manière que les pointes du fil touchent juste la surface. Former ensuite une lame mince à l'intérieur de ce fil, mesurer son augmentation de poids et en déduire la valeur de la tension superficielle. Ayant apprécié l'épaisseur de la lame au moyen de sa couleur (**VI, 134**), on verra s'il y a lieu de tenir compte du poids de cette lame (217).



de 12^{cm} de côté avec du fil de cuivre de 0^{cm} , 2, puis compléter une charpente tétraédrique avec trois autres fils de cuivre ou bien avec

trois brins de fil à coudre attachés aux trois sommets du triangle, noués ensemble et fixés à un anneau de laiton (anneau de rideau ; $d = 2^{\text{cm}}$). Préparer de même une charpente cubique à l'aide de deux carrés réunis par des fils. On construira aussi une charpente octaédrique et une charpente hélicoïde avec son axe.



Plonger ces charpentes dans l'eau de savon, et les retirer très lentement pour voir se former les systèmes laminaires (108, 163).

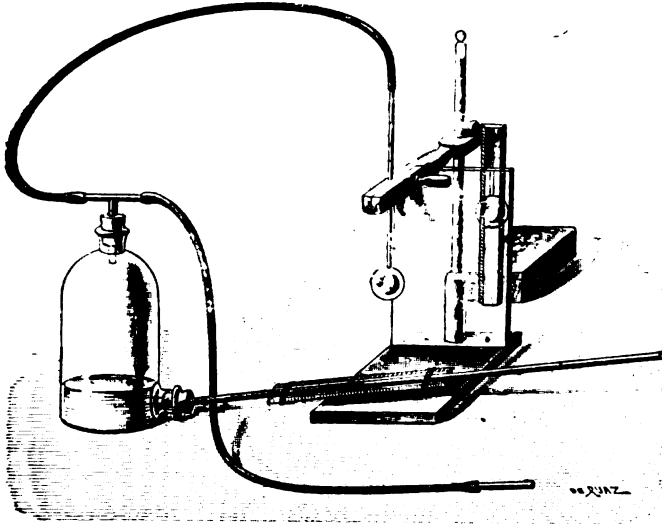
79. Perméabilité apparente des lames minces. — Souffler une bulle de savon au bord d'un entonnoir, boucher la douille avec le doigt et placer l'entonnoir pendant quelque temps dans l'atmosphère d'un vase contenant un peu d'éther. Retirant ensuite l'entonnoir on pourra enflammer la vapeur d'éther qui aura traversé la lame mince (163).

PRESSION DANS LES BULLES DE SAVON.

80. Montage. — Les pressions à mesurer sont très faibles, on pourra les mesurer avec un manomètre à deux liquides (III, 19), ou bien employer les dispositifs suivants :

Dans la tubulure inférieure d'un flacon tubulé en bas ($V = 1^{\text{l}}$), fixer un tube de verre ($l = 50^{\text{cm}}$; $D = 1^{\text{cm}}$) courbé de manière à monter sous une faible pente ($\text{tang } \alpha = \frac{1}{10}$), et attacher un double décimètre le long de ce tube avec des braccets de caoutchouc. Immobiliser le flacon sur la table avec de la cire molle ou du

plâtre et y mettre de l'eau, de manière à remplir le tube incliné jusqu'au quart de sa longueur. On diminuera l'action capillaire dans le tube manométrique en déposant une gouttelette d'essence de térébenthine à la surface du ménisque.



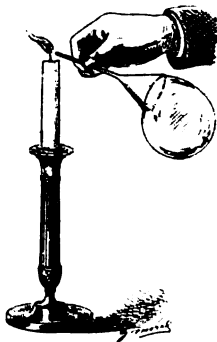
Adapter dans le goulot du flacon un tube en T muni de deux tubes de caoutchouc ($l = 50^{\text{cm}}$; $D = 0^{\text{cm}}, 8$). Dans l'un de ces tubes, fixer un tube de verre ($l = 20^{\text{cm}}$; $D = 0^{\text{cm}}, 3$) et fixer dans l'autre caoutchouc un tube de verre ($D = 1^{\text{mm}}$; $l = 10^{\text{cm}}$) étiré de manière à ne présenter qu'une ouverture capillaire (18).

Expériences. — Tremper le tube de $0^{\text{cm}}, 3$ de diamètre dans l'eau de savon; en le retirant, on y trouve un index liquide. On place ce tube horizontalement, puis on souffle très lentement par le tube capillaire et l'on observe les variations de pression qui se produisent pendant que cet index liquide est refoulé. On notera la pression quand le ménisque extérieur deviendra plan et l'on en déduira la valeur de la tension superficielle.

En continuant à souffler on formera une bulle à l'extrémité du tube et l'on calculera de nouvelles valeurs de la tension superficielle en mesurant les valeurs correspondantes de la pression et du diamètre de la bulle. Pour mesurer ce diamètre, on pourra regarder la bulle par réflexion sur une glace sans tain, et mettre

un double décimètre à l'endroit où se forme l'image virtuelle de la bulle (129).

81. Expériences diverses. — Souffler une bulle de savon au bord d'un entonnoir ($D = 10^{\text{cm}}$), et chercher à éteindre une bougie avec l'air que la bulle chasse en se dégonflant. A quel moment le jet est-il le plus énergique?



Gonfler une bulle de savon avec du gaz d'éclairage en se servant d'une petite pipe reliée au robinet à gaz par un tube de caoutchouc. Au moment où la bulle se détache, évaluer le diamètre de la bulle à l'équateur et au cercle inférieur, et, de l'équation d'équilibre, déduire une valeur de la densité du gaz d'éclairage. Y a-t-il lieu de tenir

compte du poids de la membrane? (64, 66, 151, 163).

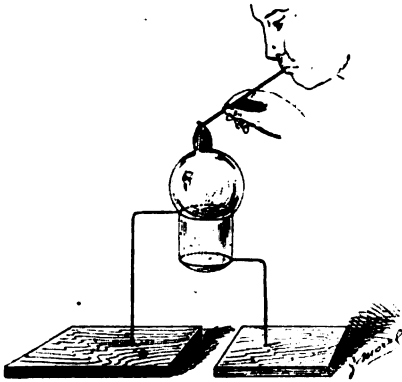
— Faire une lame de *liquide résineux* (III, 75) dans un anneau métallique ($d = 5^{\text{cm}}$) monté au bout d'un long manche. Déplacer l'anneau dans son plan d'un mouvement rapide mais régulier. On voit une *veine d'air* passer à travers l'anneau et se décomposer en bulles très nettes et très persistantes, de la même manière qu'une veine liquide se décompose en gouttes (77).

82. Déformations d'une bulle de savon. — Préparer deux anneaux métalliques ($D = 5^{\text{cm}}$) supportés par des tiges de longueurs inégales ($l = 10^{\text{cm}}$ et 15^{cm} ; $d = 0^{\text{cm}}, 3$) et les fixer dans des planchettes en pliant les tiges de manière que les anneaux se placent horizontalement. Souffler une bulle de savon ($D = 7^{\text{cm}}$) avec une pipe en terre, la déposer sur l'anneau le plus bas, préalablement mouillé d'eau de savon et détacher la goutte d'eau qui peut rester adhérente au bas de la bulle. Mesurer ensuite le diamètre de cette bulle dans différentes directions pour en reconnaître la forme sphérique.

Mouiller l'autre anneau métallique et le poser sur la bulle, puis étirer progressivement cette bulle. On aura une série de formes à courbure nulle si l'on perce l'une des calottes sphériques qui se sont formées dans les anneaux. Au contraire, si on laisse subsister ces deux membranes, on obtiendra des surfaces à courbure uniforme mais non nulle.

Dans ce dernier cas, quand on arrivera à la forme cylindrique,

on recommencera à souffler dans la bulle à travers la calotte sphérique supérieure, et l'on continuera à étirer la bulle. On arrivera ainsi à obtenir un cylindre entre les anneaux et une sphère presque



complète au-dessus de l'anneau supérieur. On mesurera alors les diamètres et l'on reconnaîtra que le diamètre de la sphère est double de celui du cylindre (108, 163).

83. Membranes semi-perméables. — Préparer une solution très étendue de *sulfate de cuivre* (à environ 1 pour 500) et préparer aussi une solution de *ferrocyanure de potassium* de concentration voisine. Les deux solutions n'ont pas exactement la même densité, mais en diluant l'une d'elles on arrivera facilement à faire en sorte qu'une goutte de la première solution puisse rester en suspension au sein de la seconde.

Si l'on fait cette expérience, on verra la goutte en suspension s'envelopper d'une membrane de ferrocyanure de cuivre : cette membrane, examinée au microscope, se présente comme absolument continue, sans aucun feutrage de cristaux.

— Mettre dans une conserve ($V = 1^l$) une solution de sulfate de cuivre presque saturée, et projeter dans le liquide un cristal de ferrocyanure de potassium. Le cristal s'enveloppe d'une membrane. Mais cette membrane étant *semi-perméable*, l'eau y pénètre, la distend, et, au bout de quelque temps, il se forme des tubes membraneux qui se développent de plus en plus en montant jusqu'à la surface (58).



CHAPITRE IV.

CHALEUR.

THERMOMÉTRIE.

1. Sensations de chaud et de froid. — Mettre la main dans une cuve d'eau tiède et déterminer la sensibilité de la main aux variations de température. — Maintenir quelque temps une main dans l'eau chaude et l'autre dans l'eau froide, placer ensuite les deux mains dans l'eau tiède. Quelles sensations éprouve-t-on ? — Mettre la main dans un vase argenté intérieurement (enceinte calorimétrique) sans toucher les parois. Quelle sensation éprouve-t-on ?

2. Comparaison de thermomètres. — Prendre différents thermomètres tels qu'un thermomètre médical vérifié par le Laboratoire d'Essais du Conservatoire, un thermomètre à alcool et un thermomètre à mercure du commerce tous deux divisés en degrés. Placer ces thermomètres dans un vase métallique plein d'eau ($V = 1^l$), chauffer lentement et noter les températures en appréciant les dixièmes de division. On produira quelques chauffes plus rapides : les quatre thermomètres suivent-ils ensemble les variations de température ?

3. Régulateurs de température. — Disposer un régulateur et un thermomètre dans un vase métallique (forme haute, $V = 0^l,5$) plein d'eau et chauffé sur un bec Bunsen. Chauffer vers 70° et agir sur le réglage du régulateur de manière à mettre le gaz en veilleuse. — Refroidir alors brusquement d'une quinzaine de

degrés en ajoutant de l'eau froide. Suivre ensuite la température, en agitant avec le thermomètre et construire la courbe du réchauffement en fonction du temps jusqu'au régime permanent. Se produit-il des oscillations de la température ?



4. Thermomètre à mercure. — On construira un thermomètre à mercure en suivant les indications que donnent les Traités de Physique. On en déterminera ensuite les points fixes.

Point zéro. — Se procurer de la neige ou de la glace très finement pilée dont on remplira un entonnoir ($V = 0^1,5$) reposant sur le rebord d'un bocal ($V = 1^1$). Placer le thermomètre dans la glace en recouvrant la tige jusqu'au zéro avec de la glace très légèrement tassée. On lira la position du mercure en estimant le vingtième de degré.

Mettre ensuite le thermomètre pendant quelques minutes dans de l'eau bouillante et prendre de nouveau le point zéro. A-t-il subi une variation sensible ?

5. Point 100. — La chaudière est constituée par un *bidon* à essence ($V = 1^1$) dont on laisse la tubulure fermée. Sur



le goulot, on ajuste à frottement un tube de laiton ($l = 15^{\text{cm}}$) vers le haut duquel on aura percé un trou ($d = 0^{\text{cm}}, 5$) pour l'échappement de la vapeur.

Mettre de l'eau dans la chaudière, et suspendre le thermomètre



par un bouchon plat de manière que, lorsqu'on chauffe, le réservoir du thermomètre et toute la colonne de mercure soient situés dans la vapeur.

— Maintenir une ébullition lente pendant quelques minutes, faire à ce moment la lecture du baromètre à un millimètre près, et faire aussi la lecture du thermomètre en le remontant de manière à apercevoir juste le niveau du mercure. On appréciera le vingtième de degré et l'on déterminera définitivement le *point* 100 en tenant compte de la valeur actuelle de la pression atmosphérique.

Correction de colonne émergente.

— Répéter la mesure en supprimant le tube de laiton qui assurait le chauffage de la tige, calculer la correction de colonne émergente et comparer le résultat incertain de cette mesure avec la valeur exacte que l'on obtenait

quand on chauffait la tige du thermomètre en même temps que le réservoir.

Influence des impuretés. — Mettre un excès de sel marin dans l'eau de la chaudière (40 pour 100), porter à l'ébullition et faire la lecture du thermomètre *plongé dans l'eau*. — Retirer le thermomètre de l'étuve, l'essuyer pour enlever l'eau salée qu'il a pu emporter et le replacer alors *dans la vapeur*. On maintiendra le thermomètre dans la vapeur pendant un quart d'heure et l'on constatera l'élévation progressive de la température, qui tend vers celle du liquide.

Si l'on retire le thermomètre et si on le chauffe à sec *au-dessus* de la température du liquide, comment se comporte-t-il quand on le met à refroidir dans la vapeur? — Si l'on trempe le thermo-

mètre dans l'eau salée de la chaudière et si on le remonte dans la vapeur, à quelle température se fixe-t-il?

Influence de la pression sur la température d'ébullition. — Préparer un manomètre à mercure fait d'un tube en U ($d = 0^{\text{cm}}, 8$; $2\ell = 60^{\text{cm}}$) qu'on fixe avec des brides en clinquant contre un support vertical (deux planchettes : 20^{cm} ; 10^{cm} ; $1^{\text{cm}}, 8$). Fixer solidement le thermomètre dans le goulot de la chaudière; relier la



tubulure de la chaudière et le manomètre à un robinet en cuivre par un tube en T et des caoutchoucs à gaz de 2^{mm} d'épaisseur fixés par des ligatures en fil de fer ($d = 0^{\text{cm}}, 1$).

Faire bouillir l'eau pendant quelque temps pour chasser l'air, puis agir sur le robinet d'échappement de la vapeur en réglant le chauffage de façon à maintenir une ébullition lente sous une pression déterminée. La manipulation consiste à noter les variations de la température d'ébullition en fonction de la pression. — On aura soin de ne pas chauffer brusquement pour éviter la projection du mercure.

Fermer ensuite le robinet d'échappement, laisser refroidir la chaudière de quelques degrés et noter les variations de la tem-

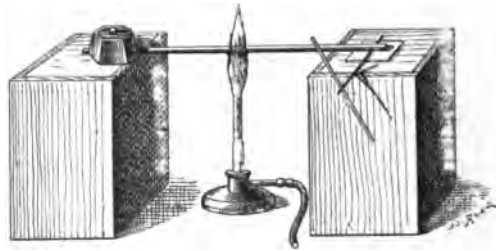
pérature d'ébullition pour des pressions inférieures à celle de l'atmosphère.

Correction de pression extérieure. — Remplir d'eau la chaudière; remplacer le robinet d'échappement par une pompe de bicyclette et essayer si un excès de pression fait monter le mercure du thermomètre. — On répétera cette dernière expérience avec un thermomètre à gros réservoir et tige très fine (thermomètre calorimétrique). Ce thermomètre est-il plus sensible aux variations de la pression extérieure? (24).

DILATATION DES SOLIDES.

6. Expériences qualitatives. — Expérience de l'anneau de S'Gravesand. — Planter dans la table deux clous dont la distance soit juste égale à la longueur d'une tige métallique (50^{cm}); la tige ne pourra plus passer entre ces deux clous si on la chauffe. — Chauffer un tube de verre ($l = 100^{\text{cm}}$; $d = 2^{\text{cm}}$) le long d'une génératrice et constater sa courbure (64, 126).

7. Amplification d'un déplacement par roulement d'un axe. — Couper 30^{cm} de tube de laiton mince ($D = 1^{\text{cm}}$; $e = 0^{\text{cm}}, 05$), placer ce tube sur deux supports (caisses en bois, $h = 20^{\text{cm}}$) et bloquer un de ses bouts sous un poids de 2^{kg} .



Entre l'autre extrémité et son support, interposer un morceau de verre à vitre ($5^{\text{cm}} \times 5^{\text{cm}}$) que l'on fera reposer sur un peu de cire molle, de manière que le tube porte bien à plat sur la plaque de verre. — Fixer à l'extrémité d'une aiguille à coudre un index de papier ou de paille permettant d'observer ses mouvements de rotation, et glisser l'aiguille entre le tube et la plaque de verre.

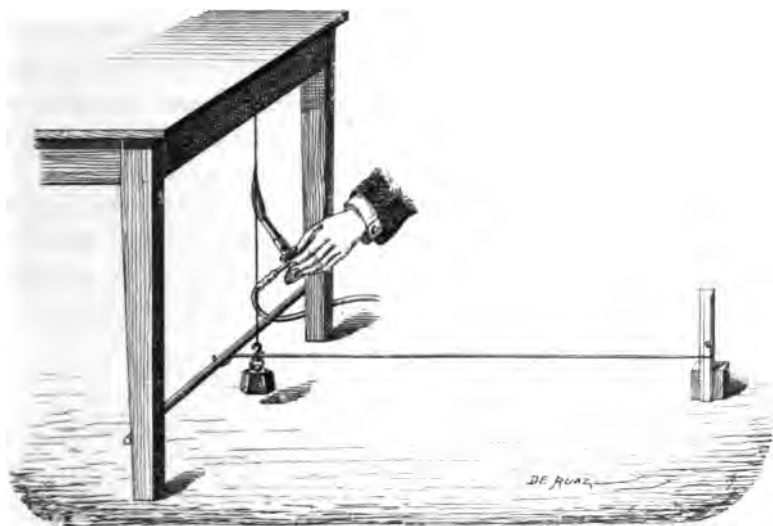
Dès que l'on chauffe le tube métallique, on voit tourner l'index

de paille. On se rendra compte du facteur d'amplification en mesurant au palmer le diamètre de l'aiguille.

— Fixer sur l'aiguille un miroir concave (miroir de galvanomètre) ($R = 100^{\text{cm}}$) et projeter sur le mur, à 1^{m} ou 2^{m} de distance, l'image d'un fil métallique ($D = 0^{\text{cm}}, 1$) tendu horizontalement devant la flamme d'une lampe. Quel est le nouveau rapport d'amplification? (41, 68, 174).

8. Amplifier la dilatation d'un fil métallique. — On dressera le fil en l'étirant fortement, à chaud s'il est nécessaire. Pour étudier la dilatation, le fil sera chauffé au moyen d'un bec de gaz qu'on promènera sur toute sa longueur, ou bien par le passage d'un courant électrique.

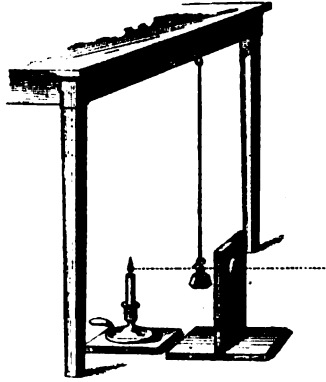
Amplification par un levier. — Suspender le fil ($l = 60^{\text{cm}}$,



$d = 0^{\text{cm}}, 1$) verticalement en l'enroulant sur deux S métalliques ($d = 0^{\text{cm}}, 5$) (II, 23) et le tendre par un poids de 2^{kg} . — Faire un crochet à l'extrémité d'un tube de verre ($l = 100^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 3$) et placer ce tube sur l'S inférieur en l'accrochant sous une tige horizontale placée à environ 5^{cm} de distance. Quel est le rapport d'amplification? (62, 64, 103).

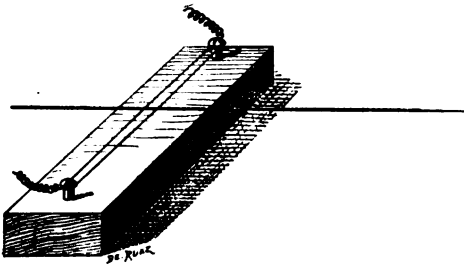
Procédé optique. — Suspender le fil verticalement comme ci-dessus. A la partie inférieure, laisser un bout de fil libre ($l = 5^{\text{cm}}$) de manière à former un index horizontal. Éclairer cet index par

derrière; et projeter l'image de la pointe sur une feuille de papier au moyen d'une lentille convergente ($f = 15^{\text{cm}}$) fixée dans une planchette (grossissement 20).



La figure représente la projection faite au moyen d'une bougie comme source de lumière. On obtiendrait, naturellement, de meilleurs résultats en employant une forte lampe et en uniformisant le fond lumineux au moyen d'une lentille ou même d'un verre dépoli (47).

Dispositif des ampèremètres thermiques. — Fixer deux vis ($d = 0^{\text{cm}}, 4$) aux extrémités d'un bloc de bois ($l = 25^{\text{cm}}$) et tendre un fil de cuivre ($d = 0^{\text{cm}}, 05$) de manière à former une boucle



passant autour des deux vis. — Passer une tige indicatrice très légère sous le milieu de l'un des fils parallèles en l'avancé jusqu'au tiers de sa longueur ($d = 0^{\text{cm}}, 1$; $l = 35^{\text{cm}}$) et l'appuyer sur l'autre fil. — Cet index se déplace pour le moindre échauffement du fil. On appréciera la flèche des fils tendus, et l'on en déduira approximativement la valeur du facteur d'amplification (2).

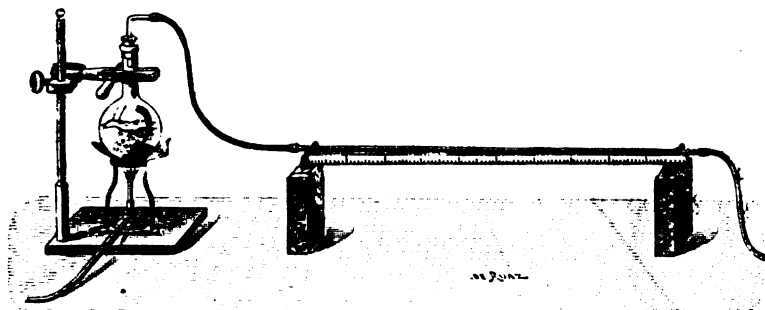
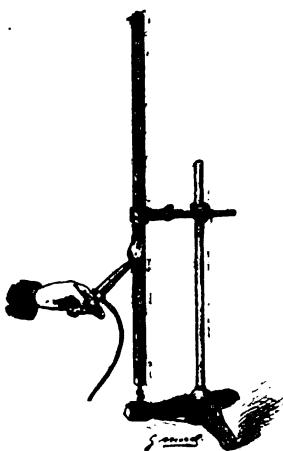
9. Dilatation négative du caoutchouc tendu — Ficeler

deux crochets aux extrémités d'un tube de caoutchouc (feuille anglaise $l = 35^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}},8$) et suspendre à ce tube des poids qui en triplent environ la longueur. Préparer, d'autre part, un tube métallique ($l = 100^{\text{cm}}$; $d = 4^{\text{cm}}$; $e = 0^{\text{cm}},05$) que l'on fixera verticalement dans un support.

Au moyen d'une ficelle lestée descendue dans le tube, remonter l'extrémité libre du caoutchouc et l'accrocher à une tige métallique transversale s'appuyant sur le bord du tube. On aura soin que le tube de caoutchouc ne touche pas le tube de métal.

Quand le caoutchouc aura fini de s'allonger, on chauffera le tube extérieur avec la flamme d'un bec Bunsen et l'on verra le caoutchouc se raccourcir de près de 1^{cm} ; on pourra amplifier ce mouvement au moyen d'un levier (IV, 8) (126, 184, 208).

10. Mesure de la dilatation d'un solide. — *Montage.* — Couper un tube de laiton ($l = 100^{\text{cm}}$; $d = 1^{\text{cm}}$). A 5^{cm} de chaque extrémité, souder perpendiculairement une lame de zinc ($6^{\text{cm}} \times 3^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}},1$). Protéger le tube, entre les deux lames de zinc,



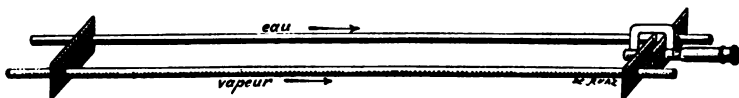
par une couche épaisse de plusieurs millimètres d'ouate ou de bandes de flanelle roulées en hélice (qui ne sont pas représentées sur la figure). — Disposer un ballon ($V = 1^{\text{l}}$) de manière à pouvoir y faire bouillir de l'eau et à pouvoir envoyer le courant de vapeur dans le tube de laiton au moyen d'un tube de caoutchouc.

Un autre tube de caoutchouc permettra l'évacuation de la vapeur. Faire, enfin, reposer le tube métallique sur deux briques en l'inclinant légèrement pour que l'eau de condensation puisse s'écouler.

Expériences. — Envoyer dans le tube un courant d'eau de la ville et noter la température de l'eau à $0^{\circ}, 5$ près. Au moyen d'un mètre en bois divisé en millimètres, mesurer la distance des deux lames en guidant le regard par le plan des lames, de manière à pouvoir estimer le $\frac{1}{10}$ de millimètre. — Envoyer ensuite le courant de vapeur dans le tube et mesurer sa nouvelle longueur, au bout de quelques minutes d'échauffement.

On déduira de ces mesures la valeur du coefficient moyen de dilatation du laiton. Quelle précision obtient-on? A quoi est due l'incertitude?

— On augmentera la précision des mesures, et l'on pourra avoir des résultats exacts à 1 pour 100 près en mesurant l'allongement au moyen d'un *palmer*. — A cet effet, à côté du tube chauffé, on en place un second monté d'une manière exactement semblable et qui sera traversé par un courant d'eau. On fait buter les plaques



postérieures l'une contre l'autre; on peut même souder les deux tubes dans la même plaque, et l'on fait la mesure de l'allongement en mesurant au palmer la variation de distance des plaques antérieures.

On mesurera de la même manière la dilatation d'un tube de verre, en soudant les lames de zinc sur des viroles fendues en laiton ($l = 2^{\text{cm}}$; $e = 0^{\text{cm}}, 1$) entrant à frottement sur le tube de verre (20, 90, 176, 200, 217).

DILATATION D'UN LIQUIDE.

11. Dilatation absolue. — *Montage.* — Préparer deux tubes de verre ($l = 50^{\text{cm}}$; $D = 1^{\text{cm}}, 6$; $e = 0^{\text{cm}}, 1$) et enrouler sur l'un d'eux une hélice en fil de fer (150 spires; $d = 0^{\text{cm}}, 1$). Fixer ces deux tubes verticalement à 15^{cm} l'un de l'autre au moyen de deux planchettes (10^{cm} ; $2^{\text{cm}}, 5$; $1^{\text{cm}}, 5$). Ces planchettes sont vissées

contre le bord de la table après que l'on a engagé chaque tube de verre dans une encoche en V pratiquée dans la planchette, en ayant soin d'interposer un morceau de tube de caoutchouc entre le verre et le bois. Visser aussi contre le bord de la table une règle divisée en millimètres qui descendra verticalement entre les deux tubes.

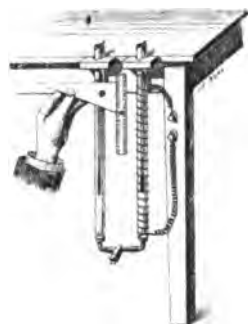
On fait communiquer les deux tubes par leur partie inférieure au moyen d'un raccord en caoutchouc (feuille anglaise; $D = 0^{\text{cm}}, 8$) et de deux tubes de verre coudés ($d = 0^{\text{cm}}, 8$) fixés dans des bouchons. On serre enfin les deux extrémités de la spirale de fil de fer dans des bornes vissées sur le pied de la table.

Expériences. — Mettre dans les tubes de l'eau ou, de préférence, du toluène, et y suspendre des thermomètres au moyen de crochets en fil de cuivre ($d = 0^{\text{cm}}, 1$). Fermer le tube de communication en le serrant avec une pince et envoyer dans l'hélice de fil de fer un courant électrique (10 ampères).

On uniformise les températures en agitant avec les thermomètres ou bien en insufflant quelques bulles d'air avec un tube de verre ($D = 0^{\text{cm}}, 3$). Quand la température du tube chaud atteint 90° , on diminue le courant de manière que la température soit presque stationnaire. On rétablit alors la communication entre les deux tubes et on lit les températures, puis on détermine (au demi-millimètre) la différence de hauteur des niveaux en les reportant avec une équerre sur la règle graduée. On mesure aussi la hauteur de la colonne chauffée et l'on peut alors calculer le coefficient moyen de dilatation du liquide.

On pourra remplacer le chauffage électrique par le chauffage au moyen d'une flamme qu'on promènera le long du tube, et l'on pourra porter le liquide *au voisinage* immédiat de la température d'ébullition (8, 18, 147).

12. Dilatation apparente. Dilatomètres. — *Montage.* — Prendre pour dilatomètre un ballon à fond plat à col court ($V = 250^{\text{cm}^3}$) dans lequel on ajuste un bouchon traversé par un tube de verre ($l = 100^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 7$). Préparer un bain-marie assez profond pour que le ballon puisse y être plongé complètement, et au fond duquel on aura placé un triangle en fer.



On préparera aussi, pour alourdir le ballon, un collier métallique fait d'un tube de plomb pesant une centaine de grammes.

Dilatomètre à tige. — Peser le ballon vide, avec le bouchon et le tube. Remplir le ballon avec le liquide étudié (toluène ou eau) en achevant le remplissage au moyen d'un tube droit formant pipette ($l = 100^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 3$), de manière qu'il ne reste pas de bulle d'air et que le grand tube vertical soit rempli jusqu'en haut.



Déterminer le poids du liquide qu'on vient ainsi d'introduire, puis vider partiellement le grand tube pour déterminer sa capacité par une nouvelle pesée. Placer ensuite le ballon dans l'eau du bain-marie et régler le chauffage de manière à maintenir une température constante.

On attendra que la colonne liquide soit immobile, et l'on mesurera sa longueur au-dessus du ballon, à un millimètre près. On notera la température de l'air à côté de la tige volumétrique pour faire la correction de colonne émergente et l'on calculera le coefficient de dilatation absolue du liquide, en acceptant, par exemple, la valeur $2,6 \cdot 10^{-5}$ comme coefficient de dilatation cubique du verre.

Dilatomètre à poids. — Remplacer le grand tube de l'expérience précédente par un tube étroit ($l = 20^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 2$) courbé en forme de Γ et opérer par des pesées en recueillant le liquide dans un petit flacon ($V = 50^{\text{cm}^3}$).

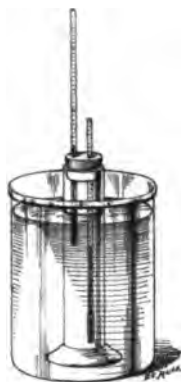
— On pourra aussi déterminer les variations de la poussée que subit un poids en laiton (500^{g}) quand on l'immerge dans l'eau à différentes températures.

13. Maximum de densité de l'eau. — *Refroidissement d'une masse d'eau.* — Ajuster un bouchon sur une éprouvette à pied ($h = 25^{\text{cm}}$), et fixer dans ce bouchon deux thermomètres

divisés en degrés, qui plongeront l'un au fond, l'autre en haut de l'éprouvette. Mettre dans l'éprouvette soit de l'eau pure, soit de l'eau contenant 10 pour 100 de sel marin, et placer le tout dans une conserve en verre ($V = 2^l$) contenant un mélange réfrigérant fluide de glace, de sel et d'eau.

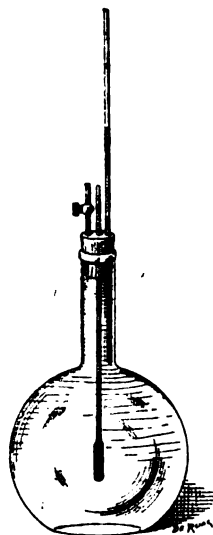
Sortir de temps en temps l'éprouvette en évitant d'agiter l'eau, et lire les températures indiquées par les deux thermomètres, en appréciant les fractions de degrés. — On construira les courbes de refroidissement des deux thermomètres, et l'on en déduira la température du maximum de densité.

— L'expérience peut être faite en sens inverse en mettant dans l'éprouvette de l'eau à zéro qu'on laissera se réchauffer dans unseau d'eau (42).



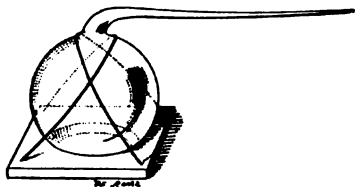
Procédé du dilatomètre. — Il est assez délicat de déterminer la température du maximum de densité par les variations de volume de l'eau. On pourra remplir une fiole à fond plat ($V = 1^l$) soit avec de l'eau pure, soit avec de l'eau contenant 10 pour 100 de sel marin et la fermer avec un bouchon bien ajusté dans lequel on aura fixé un thermomètre, un tube étroit ($l = 50^{\text{cm}}$; $D = 0^{\text{cm}}, 7$; $d = 0^{\text{cm}}, 1$) et un robinet en cuivre à tige (petit modèle); en bouchant la fiole on fera jaillir l'eau par le robinet qu'on laissera ouvert.

L'appareil sera mis ensuite dans de la glace pilée, de manière à amener l'eau vers 0° . On fermera alors le robinet, on sortira le ballon de la glace et on le laissera se réchauffer dans unseau d'eau en notant simultanément les températures et les déplacements du niveau de l'eau dans le tube étroit. Sur la courbe représentative, on mènera la tangente parallèle à la direction qu'indique le coefficient de dilatation cubique du verre, et l'on déterminera ainsi graphiquement la température du maximum de densité de l'eau (108, 173).



DILATATION D'UN GAZ.

14. Dilatomètre à poids. — Prendre un *ballon à densité*, ouvrir la pointe et le sécher par deux ou trois flambages. Placer le ballon sur un support qui permette de le tenir dans l'eau (III, 9), le chauffer quelques minutes dans l'eau bouillante et fermer la pointe du col étiré en la fondant dans la flamme d'un bec Bunsen.



Retirer le ballon de l'eau chaude et le tarer, après refroidissement, à quelques décigrammes près.

Plonger alors le ballon dans un seau d'eau, et en casser la pointe effilée. L'eau monte dans le ballon; on le maintient un instant à la surface de l'eau, de manière que l'air restant soit à la pression atmosphérique, puis on essuie le ballon et l'on détermine son augmentation de poids.

Couper ensuite le col du ballon à un endroit où il ait un diamètre d'au moins $0^{\text{cm}},6$. Achèver de remplir le ballon d'eau en se servant d'un tube à entonnoir effilé et déterminer la nouvelle augmentation de poids, en tenant compte du poids de la partie du col que l'on a enlevée. On déduira de ces pesées la valeur du coefficient moyen de dilatation de l'air. Y a-t-il lieu, dans ce calcul, de tenir compte de la pression de la vapeur qui se forme quand on ouvre le ballon sur l'eau? Doit-on tenir compte de la dilatation du ballon?

— On pourrait, pour cette expérience, remplacer le *ballon à densité* par un flacon ordinaire ($V = 375^{\text{cm}^3}$) fermé par un bouchon traversé par un robinet ou par un tube de verre effilé (174, 200).

15. Dilatomètre à tige. — Préparer plusieurs tubes de verre *très propres* de $0^{\text{cm}},2$ de diamètre intérieur ($l = 35^{\text{cm}}$), et les sécher par des flambages répétés. Envoyer dans chacun d'eux un courant d'un gaz sec déterminé (gaz d'éclairage, hydrogène, anhydride carbonique, air, etc.) en faisant barboter le gaz, à la sortie du tube, dans un godet contenant quelques centimètres cubes de mercure propre.

Dès que l'on aura arrêté le courant de gaz, on fermera le tube par un trait de chalumeau, puis on le chauffera un peu pour chasser

une bulle de gaz. En retirant le tube après refroidissement il sera fermé par un index de mercure. On fera tomber une gouttelette de mercure au fond du tube pour remplir la partie effilée; puis, glissant un fil de verre dans l'index de mercure et contre le tube, on laissera échapper du gaz de manière qu'il en reste dans chacun des tubes une même longueur de 20^{cm}.

Placer tous ces tubes dans une éprouvette à pied ($h = 30^{\text{cm}}$) contenant de l'eau glacée. Mesurer avec un triple décimètre la longueur des colonnes gazeuses et noter la température de l'eau. Remplacer alors l'eau froide par de l'eau d'abord tiède, puis chaude, et mesurer les volumes et les températures. Avant chaque lecture, on fera prendre aux index leurs positions d'équilibre par de très légères secousses. Des mesures faites, on déduira les coefficients de dilatation. Les gaz étudiés ont-ils la même dilatation?



16. Augmentation de pression à volume constant. — *Montage.* — Flamber un flacon tubulé de 250^{cm³} pour le sécher; y mettre du mercure sur une hauteur de 2^{cm}; adapter dans le goulot un tube droit ($l = 50^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}},7$) qui plonge dans le mercure, et fixer un robinet de métal ou de verre dans la tubulure. Les bouchons devront être très soigneusement ajustés.

Expériences. — Ouvrir le robinet et mettre l'appareil pendant plusieurs minutes dans de l'eau à la température du laboratoire, noter cette température et fermer le robinet.

Transporter le flacon dans un bain-marie où il soit bien noyé, en le faisant reposer sur un triangle en fer. Chauffer à l'ébullition, prendre la température de l'eau, marquer le niveau du mercure avec une bague de caoutchouc (morceau de tube, $l = 0^{\text{cm}},1$), et retirer l'appareil du bain-marie. Mesurer ensuite, à un millimètre près, la hauteur du repère au-dessus du niveau du mercure.

On calculera d'abord le coefficient d'augmentation de pression de l'air sans faire aucune correction. La précision de la mesure est-

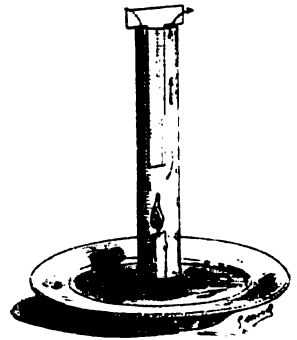
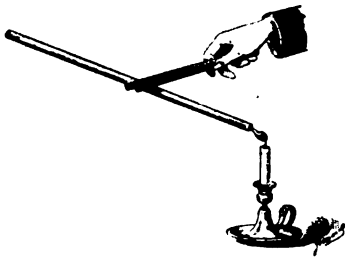


elle suffisante pour qu'il y ait lieu de tenir compte du volume de mercure qui monte dans le tube, de la dilatation du verre, de la dilatation du mercure et de la pression de la vapeur du mercure?

On pourra répéter l'expérience en remplissant l'appareil avec du gaz carbonique que l'on fera arriver par le tube central et dont on fera passer plusieurs litres avant de fermer le robinet (33, 174).

COURANTS DE CONVECTION.

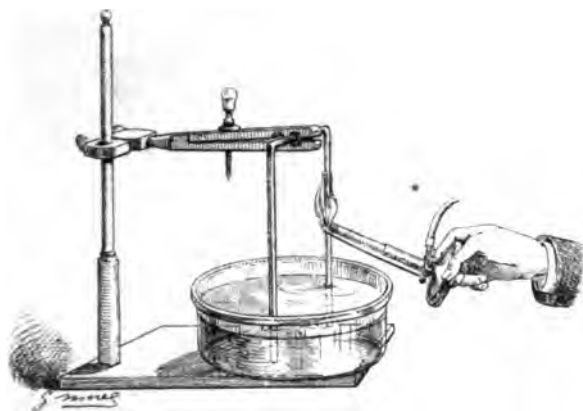
17. Courants d'air. — Étudier les courants d'air en haut et en bas d'une porte entr'ouverte, ou près d'une cheminée, à l'aide d'une flamme de rat-de-cave ou avec de la fumée de tabac qu'on soufflera doucement à l'endroit voulu au moyen d'un tube de verre. — Constater l'existence d'un courant d'air dans un tube incliné que l'on chauffe extérieurement. — Imiter le fonctionne-



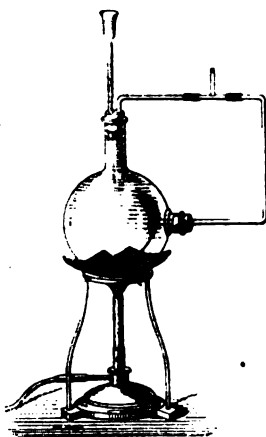
ment d'une cheminée avec une bougie et un tube de verre incliné ($D = 1^{\text{cm}}, 5$; $l = 60^{\text{cm}}$). — Essayer de faire brûler une bougie au fond d'un verre de lampe à gaz placé sur une assiette qui contient de l'eau. Lorsque la bougie est sur le point de s'éteindre, cloisonner le tube de verre au moyen d'une feuille de papier : un rapide courant d'air s'établit, descendant d'un côté de la feuille de papier et montant de l'autre, et produit une active combustion de la bougie (161, 173).

18. Circulation d'eau. — *Thermosiphons, calorifères.* — Courber deux tubes de verre à angle droit ($l = 50^{\text{cm}}$; $d = 1^{\text{cm}}$) et les réunir par un joint en caoutchouc. Remplir d'eau le tube

en Π ainsi formé et le renverser sur un cristalliseur plein d'eau dans lequel on aura mis en suspension des poussières légères



(sciure de bois ou précipité floconneux). On chauffe l'une des branches du siphon et l'on observera le mouvement du liquide.

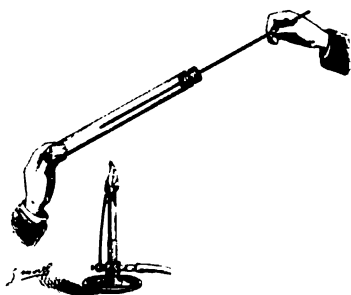


— Employer aussi le dispositif de la figure ci-contre (8, 168).

FUSION.

19. Détermination d'un point de fusion. — Quand on ne peut opérer que sur une très petite quantité de matière, on fait adhérer par fusion une parcelle du corps sur un thermomètre; et

l'on place le thermomètre dans un tube à essais. On chauffe ce bain d'air d'un peu loin au-dessus d'une flamme, en tournant constamment jusqu'à ce qu'on observe la fusion (22).



Fusion de la stéarine, de la naphthaline, etc. — Remplir à moitié un tube à essais avec la matière étudiée, fondre franchement dans la flamme d'un bec Bunsen et laisser refroidir. Noter les températures de minute en minute en agitant constamment, et relever la température du palier de la courbe de refroidissement.

Fusion des alliages de plomb et d'étain. — On chauffera le métal dans un creuset en fonte ou dans une petite casserole en fer; avec quelque soin, l'expérience pourrait être faite dans un verre de Bohême. Mettre d'abord à fondre un poids connu (200^g) d'étain pur en agitant avec une baguette de bois. Lorsque le métal est fondu, y plonger un thermomètre pouvant monter à 360°, éteindre le feu et suivre la température.

Construire la courbe de refroidissement et noter la température du palier (point de fusion de l'étain) : on estimera la correction de colonne émergente.

Ajouter ensuite 30^g de plomb et prendre de la même manière le nouveau point de fusion. Ajouter successivement des doses de plomb égales à 30^g et construire la courbe des points de fusion en fonction de la teneur en plomb. On observera un minimum de la température de fusion. Correspond-il à un composé défini?

— Fondre un alliage très riche en plomb (7 parties de plomb pour 1 d'étain). Laisser refroidir et construire la courbe des températures. Y a-t-il un seul palier sur cette courbe (104, 200)?

— Pour des expériences de cours, on pourra suivre toutes ces variations de températures avec un couple thermoélectrique relié à un galvanomètre.

20. Moulage de la glace. Regel. — Mettre une épaisseur de 1^{cm} ou 2^{cm} de glace concassée entre deux planchettes (10^{cm} ; 10^{cm} ; 1^{cm} , 5). Serrer fortement le tout dans un étau : les fragments de glace seront transformés en une plaque dont on pourra augmenter encore l'homogénéité par une nouvelle compression.

— Fabriquer, de même, un cylindre de glace en comprimant à



coups de marteau de la glace concassée entre les extrémités de deux barres de fer ($d = 2^{\text{cm}}$) glissant dans un tube métallique.

— Attacher une boucle de fil d'acier ($l = 70^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 04$) à

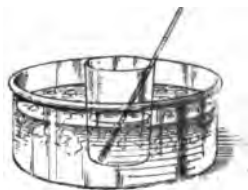


l'anneau d'un poids en fonte de 10^{kg} , passer cette boucle autour d'un bloc de glace et faire reposer ce bloc sur deux tables rapprochées : le fil d'acier traverse la glace sans que le bloc soit coupé.

CRYOSCOPIE.

21. Abaissement du point de congélation de l'eau. — Mettre un poids connu d'eau (200^{g}), avec un thermomètre, dans

un verre sans pied. Placer ce verre dans un cristalliseur contenant un mélange réfrigérant faible (glace, sel et eau) et suivre le refroidissement en agitant constamment avec le thermomètre. On sort de temps en temps l'appareil du mélange réfrigérant pour mieux assurer l'égalisation des températures.



Laisser d'abord se former un peu de glace et constater que le thermomètre se fixe ; retirer ensuite le verre du mélange réfrigérant et constater que le thermomètre reste encore fixe pendant la durée de la fusion, et noter cette température. Dans cette détermination de la température de congélation, on appréciera les vingtièmes de degré.

Continuer l'expérience en déterminant de la même manière la température de congélation de l'eau dans laquelle on aura fait dissoudre un poids quelconque de sucre (environ $\frac{1}{10}$ de molécule-gramme) : on fait congeler un peu d'eau et l'on note la température de congélation. S'il s'était formé plusieurs grammes de glace, on laisserait l'eau se réchauffer à l'air et, en agitant toujours, on noterait la température lorsqu'il ne resterait plus que très peu de glace. — Si l'on élève progressivement la dose de sucre jusqu'à $\frac{1}{2}$ molécule-gramme, l'abaissement du point de fusion est-il proportionnel à la concentration ?

— Déterminer de la même manière les points de congélation de l'eau contenant un poids connu (environ $\frac{1}{2}$ molécule-gramme) d'alcool, de mannite ou d'acide acétique dans la même quantité d'eau (200^g) et comparer les abaissements obtenus avec ceux que l'on déduirait de la loi de Raoult.

— Répéter enfin l'expérience avec les mêmes quantités moléculaires d'un sel (sulfate de sodium ou nitrate d'ammonium). Y a-t-il un désaccord avec la loi de Raoult ? (92, 198).

22. Cryoscopie dans la benzine. — Pour purifier la benzine, on la fera cristalliser presque complètement en mettant dans la glace le flacon qui la contient et rejetant le liquide en excès.

— On gardera les mêmes dispositifs que pour l'eau, mais on n'aura besoin d'employer comme réfrigérant que de l'eau glacée. Comme corps dissous, on pourra prendre de la naphthaline, de la nitrobenzine, du camphre, ou de l'acétone en quantités croissantes, jusqu'à environ $\frac{1}{10}$ de molécule-gramme (92, 198).

23. Mélanges réfrigérants. — *Glace et sel marin.* — Faire des mélanges aussi homogènes que possible de sel marin pulvérisé et de neige (ou de glace finement broyée), en prenant 1, 2 ou 4 parties de sel pour 6 de glace. Quel est le mélange qui donne la plus basse température ?

Glace et chlorure de calcium. — Faire une étude semblable avec du chlorure de calcium cristallisé (à 6^{mol} d'eau) en prenant 3, puis 7 et 10 parties de neige pour 10 parties de sel. Du mercure, placé dans un tube à essais, peut-il être congelé dans le second mélange ?

Nitrate d'ammonium. — Mettre 6 parties de nitrate dans 10 parties d'eau et prendre la température du mélange. Utiliser ce mélange pour refroidir séparément une nouvelle quantité de nitrate et aussi une nouvelle quantité d'eau qui, à zéro, sera additionnée d'un peu de nitrate pour éviter sa congélation. Si l'on fait un nouveau mélange réfrigérant avec ces éléments refroidis, obtient-on une température plus basse qu'avec les corps pris à la température du laboratoire ?

SURFUSION.

24. Salol. — Remplir à moitié un tube à essais avec du salol, chauffer doucement dans la flamme d'un bec Bunsen (fusion à 42°), de manière à ne pas laisser de parcelles solides sur les parois. Laisser ensuite le tube se refroidir à l'air. La surfusion ne cesse que par l'addition d'un cristal de salol (60).

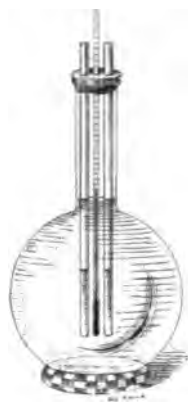
Soufre. — Couper deux tubes de verre ($l = 50^{\text{cm}}$; $d = 1^{\text{cm}}$) et les laver avec de l'acide sulfurique en chauffant un peu; rincer à l'eau distillée, puis à l'alcool, et sécher par un courant d'air qu'on filtre sur un tampon d'ouate. Fermer ensuite ces tubes à une extrémité et y introduire du soufre en petits fragments, sur une longueur de 10^{cm}, en se servant d'un tube à entonnoir, pour que le soufre ne s'attache pas aux parois. Ajuster enfin ces deux tubes, avec un thermomètre, dans un bouchon plat.

Faire fondre le soufre en chauffant ces tubes dans un ballon de 2 litres contenant du chlorure de calcium additionné d'une très petite quantité d'eau. Transporter ensuite les tubes dans un autre

ballon, posé sur un *valet* ou sur un rond de serviette, et contenant de l'eau bouillante. On pourra encore laisser refroidir : la surfusion se maintiendra jusque vers 80°.

En projetant alors soit un cristal octaédrique soit un cristal prismatique dans les tubes, la cristallisation se produit indifféremment en se propageant à partir de l'une ou l'autre amorce cristalline, mais plus lentement pour les octaèdres que pour les prismes.

Les cristaux étant formés, si on les maintient au-dessous de 97°,5, une amorce octaédrique projetée sur le soufre prismatique en provoque la transformation, et la masse qui était transparente devient opaque. — La transformation inverse peut être produite au-dessus de 97°,5 (60, 64, 73).



Phosphore. — Préparer un tube de verre fermé à un bout

($d = 2\text{cm}$; $l = 35\text{cm}$), le nettoyer avec de l'acide sulfurique tiède, le rincer à l'eau, puis l'ajuster, avec un thermomètre, dans un bouchon. Mettre dans ce tube du phosphore et de l'eau, fondre le phosphore en chauffant le tube au bain-marie et le mettre ensuite à refroidir dans un ballon de 3 litres posé sur un *valet* ou un rond de serviette et contenant de l'eau à 45°. On peut maintenir la surfusion jusqu'à 35°, et la surfusion ne cesse que par l'addition d'une trace de phosphore *blanc*.



Le tube à phosphore peut servir indéfiniment en le conservant plein d'eau à l'abri de la lumière.

Si le phosphore dont on dispose n'était pas très propre, on le fondrait en l'agitant doucement dans de l'eau chaude additionnée d'un peu de bichromate de potasse et d'acide sulfurique. Le phosphore serait ensuite moulé en baguettes, en l'aspirant avec une

poire en caoutchouc dans des tubes de verre ($d = 1^{\text{cm}}$); mais cette dernière manipulation présente quelque danger (60).

Eau. — Nettoyer un tube à essais avec de l'acide sulfurique tiède, le rincer à l'eau et le remplir à moitié d'eau distillée. Faire bouillir cette eau quelques instants et fermer le tube à essais avec un bouchon traversé par un thermomètre.

Refroidir l'eau dans un mélange fluide de glace et de sel jusqu'à ce que le thermomètre marque environ $+5^{\circ}$; sortir alors le tube et l'agiter quelques instants pour refondre la glace qui a pu se former. Replacer ensuite le tube dans le mélange réfrigérant pendant une ou deux secondes seulement; le sortir de nouveau et l'agiter doucement, puis le refroidir encore une ou deux secondes, et ainsi de suite jusqu'à ce que l'eau soit surfondue de 1 ou 2 degrés.



Pour aller plus loin, on mettra le tube dans le mélange réfrigérant et on le sortira alternativement de seconde en seconde, mais en évitant toute agitation brusque qui ferait cesser la surfusion.

— En opérant de cette manière on peut abaisser la température de l'eau jusqu'à une dizaine de degrés au-dessous de zéro sans qu'elle se congèle (60).

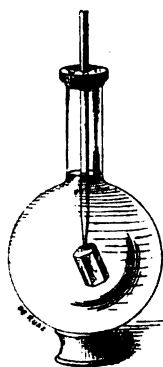
25. Surfusion de quelques sels. — Mettre quelques gouttes d'eau dans un ballon de 1 litre et le remplir aux trois quarts avec de l'hyposulfite de sodium cristallisé. — Chauffer doucement (fusion à 48°) en promenant le liquide sur les parois pour ramasser toutes les parcelles cristallines et laisser refroidir à la température du laboratoire.

L'introduction d'un cristal d'hyposulfite fait cesser la surfusion, et la température remonte vers 48° . — Pour une expérience de cours, on peut montrer cette élévation de température en plaçant dans le ballon un tube effilé contenant de l'éther. Au moment de la solidification, l'éther se met à bouillir et l'on enflamme le jet de vapeur qui s'échappe par la pointe du tube (60, 63).

— On étudiera de la même manière la surfusion de l'azotate de calcium cristallisé (fusion à 49°) ou de l'acétate de sodium cristallisé (fusion à 59°) (60).

26. Développement d'un cristal. — Préparer un ballon d'hyposulfite surfondu au milieu duquel on a placé un tube de

verre ($d = 1^{\text{cm}}$; $l = 40^{\text{cm}}$) dont l'extrémité est étirée en pointe très fine.



Introduire une amorce cristalline dans ce tube. — Lorsque la cristallisation a atteint la pointe effilée, un *cristal unique* se forme, dont on peut suivre le développement à vue d'œil.

27. Mélanges surfondus. — Préparer séparément de l'hyposulfite de sodium et de l'acétate de sodium surfondus; et mêler les deux liquides. — Si l'on provoque la solidification de l'acétate, les cristaux se forment au sein de l'hyposulfite liquide qui reste surfondu et que l'on peut faire cristalliser à son tour. En chauffant ensuite la masse vers 50° , on refondrait l'hyposulfite seul (60).

DISSOLUTION.

28. Densité des solutions de sulfate de sodium. — Dissoudre 20^{g} de sulfate anhydre dans environ 150^{cm^3} d'eau chaude, refroidir la solution et compléter son volume à 200^{cm^3} . — Prendre la densité de cette solution titrée avec un densimètre (densimètre dit *pour jus de betteraves*, densités de 1000 à 1100).

Séparer ensuite les 200^{cm^3} de solution concentrée en deux parties, l'une de 140^{cm^3} et l'autre de 60^{cm^3} que l'on complètera toutes deux au volume de 200^{cm^3} , et prendre les densités des deux solutions obtenues. La densité varie-t-elle proportionnellement à la concentration? — On déduira de ces mesures la courbe donnant la quantité de sel dissoute dans 100^{g} d'eau, en fonction de la lecture du densimètre.

29. Solubilité du sulfate de sodium à différentes températures. — Dissoudre à refus du sulfate de sodium anhydre (600^g) dans de l'eau bouillante (un litre); puis laisser refroidir en présence de l'excès de sel et en agitant constamment. — Aux températures 100°, 70°, 40°, 35°, 30° et 25°, on prélèvera 40^{cm³} du liquide en se servant d'une pipette jaugée. Ces échantillons seront immédiatement dilués à 200^{cm³}, et l'on en déterminera la composition par le densimètre en utilisant la courbe précédemment établie.

On déduira de ces mesures la courbe de solubilité du sulfate de sodium et l'on déterminera, en particulier, la température du point anguleux (161).

30. Sursaturation. — Dans un ballon de 1 litre, verser environ 300^{cm³} d'une solution chaude de deux parties de sulfate de sodium cristallisé dans une partie d'eau (les mêmes proportions conviendraient pour de l'acétate de sodium; pour le chlorure de calcium, on mettrait trois fois moins d'eau). Fermer le ballon au moyen d'un bouchon traversé par deux tubes de verre contenant des tampons d'ouate qui permettront de faire passer à travers le liquide de l'air privé de poussières. Faire bouillir un moment la solution pour que les parois soient bien mouillées par l'eau de condensation et laisser ensuite refroidir.



— On ne fait pas cesser la sursaturation en envoyant un courant d'air filtré à travers les tampons d'ouate, mais la cristallisation est obtenue à coup sûr en faisant barboter dans le liquide de l'air non filtré.

— Ces expériences expliquent pourquoi l'on conserve les solutions sursaturées de sulfate de sodium et d'alun en les protégeant contre la chute des poussières de l'air. Un moyen bien simple d'y arriver consiste à recouvrir le col du ballon avec un capuchon de papier pendant qu'on fait bouillir le liquide (60, 77).

31. Sursaturations des mélanges d'hydrates. — Une solution de deux parties de sulfate de sodium cristallisé dans une partie d'eau, que l'on fait bouillir longuement, laisse déposer à chaud du sulfate anhydre; si on la laisse refroidir au-dessous de + 8°, il se dépose un hydrate à 7^{mol} d'eau et la solution reste sursaturée pour le sel primitif à 10^{mol} d'eau.

— L'hyposulfite de sodium cristallisé (à 5^{mol} d'eau) que l'on fond avec un peu d'eau et que l'on fait bouillir quelque temps, laisse déposer par refroidissement des cristaux d'hydrate à 2^{mol} d'eau en restant sursaturé pour le sel primitif.

— Dans ces deux expériences, si l'on sépare les premiers cristaux formés en filtrant le liquide *chaud*, on obtient par refroidissement un liquide qui est sursaturé pour les deux hydrates à la fois, et dans lequel une amorce cristalline provoque à volonté la cristallisation de l'un ou de l'autre sel (60).

32. Sursaturation du gaz carbonique. — Nettoyer un verre avec de l'acide sulfurique tiède, de l'eau distillée et de l'alcool; puis remplir doucement le verre avec de l'eau de Seltz que l'on fera couler le long de la paroi. Il suffira de faire vibrer le verre pour obtenir le dégagement tumultueux de l'excès de gaz dissous.

La solution gazeuse pourrait être conservée plusieurs jours à l'air libre à l'état de sursaturation (60).

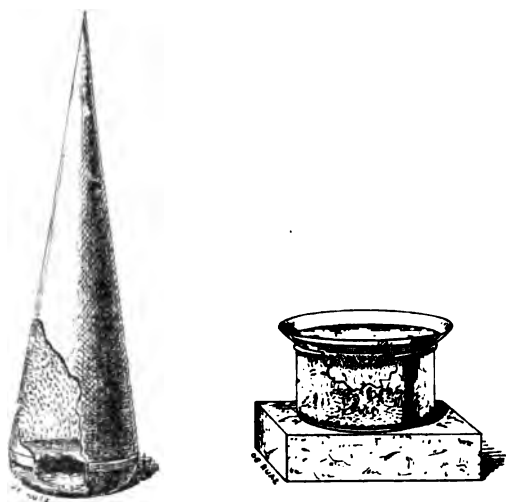
CRISTALLISATION.

33. Cristallisation par fusion. — Dans un creuset en terre ($V = 850^{\text{cm}^3}$) mettre du soufre en canons que l'on fondra doucement. Laisser ensuite refroidir. Dès qu'une croûte se forme à la surface, percer cette croûte avec un agitateur aux deux extrémités d'un diamètre, faire écouler l'excès de soufre fondu et détacher la croûte superficielle pour dégager le feutrage d'aiguilles cristallines. Après refroidissement complet on pourra provoquer la transformation en soufre octaédrique en projetant dans le creuset quelques poussières de soufre natif.

34. Cristallisation par sublimation. — Mettre environ 50^{g} de naphthaline dans un *têt à rôtir* ($d = 12^{\text{cm}}$); recouvrir le têt d'une feuille de papier de soie posée à plat, puis d'un cône en carton mince ($h = 40^{\text{cm}}$) et coller du papier sur les bords pour faire le joint avec le têt à rôtir. Chauffer ensuite lentement. Après refroidissement, on trouvera les cristaux de naphthaline sublimés sur la surface intérieure du cône de carton.

— La sublimation de l'iode peut se faire dans un cristalliseur en verre mince ($d = 10^{\text{cm}}$) que l'on place sur une brique chaude

et que l'on recouvre d'un verre de pendule contenant un peu d'eau.



35. Cristallisation par évaporation. — Évaporer une solution saturée et filtrée de sel marin brut (sel gris) à laquelle on aura ajouté quelques impuretés solubles (bromures, sulfates, etc.) et que l'on chauffera au bain de sable vers 60° . Décanter ensuite les eaux mères et laver le sel à l'eau froide.

On se rendra compte de l'efficacité de ce procédé de purification en recherchant les impuretés primitives dans les eaux mères et dans une solution du sel purifié.

36. Cristallisation par refroidissement. — Faire une solution chaude d'acide borique (30^{g}), de chlorate de potassium (60^{g}), d'alun (300^{g}) ou d'azotate de potassium (300^{g}) dans 100^{g} d'eau; laisser refroidir et séparer les cristaux obtenus.

37. Nourriture d'un cristal. — Faire cristalliser une solution saturée d'alun par évaporation lente (24^{h}). Examiner les cristaux et en choisir deux ou trois bien réguliers et sans macles. Placer ces cristaux bien séparés, au fond d'un cristalliseur contenant la solution saturée d'alun et laisser évaporer très lentement en recouvrant le cristalliseur d'une feuille de papier.

On examinera les cristaux deux fois par jour et on les fera se développer uniformément en les plaçant successivement sur toutes leurs faces.

COMPRESSIBILITÉ ET LIQUÉFACTION D'UN GAZ.

38. Compressibilité de l'air. — Montage. — Couper et border un tube de verre ($D = 0^{\text{cm}}, 8$; $l = 45^{\text{cm}}$), y adapter un tube de caoutchouc ($d = 0^{\text{cm}}, 8$; $e = 0^{\text{cm}}, 2$; $l = 65^{\text{cm}}$) et rendre le joint solide et étanche par une ligature en fil de cuivre ($d = 0^{\text{cm}}, 1$).



A l'autre extrémité du caoutchouc on montera, de la même manière, une fiole pour niveau d'eau, ou bien un tube à entonnoir dont on aura coupé la tige à quelques centimètres de la soudure. On enroulera du fil de cuivre ($d = 0^{\text{cm}}, 1$) autour du tube à entonnoir, à sa partie supérieure, de manière à former un anneau qui permettra de le suspendre.

Couper, d'autre part, une planche de sapin ($100^{\text{cm}} \times 7^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}$); planter quelques clous à crochet dans sa longueur, à 2^{cm} du bord et fixer cette planche contre un support vertical (caisse en bois, $h = 20^{\text{cm}}$). Attacher le tube de verre contre la planche au moyen de fils de cuivre, serrés à la pince, en interposant un fragment de tube de caoutchouc entre le verre et le fil métal-

lique. L'ouverture du tube sera placée à 20^{cm} du bord supérieur.

On fera bien de disposer cet appareil sur une feuille de tôle mince ($0^{\text{cm}}, 03$) dont on relèvera les bords, afin de recueillir le mercure en cas d'accident.

Expériences. — Remplir l'appareil de mercure en ayant soin de mettre le bas du tube à entonnoir au niveau de l'ouverture du tube droit; puis descendre ce tube à entonnoir de manière à faire entrer dans le tube droit une colonne d'air d'environ 16^{cm} .

Pour fermer le tube à air on choisit un bouchon de liège *extra fin*. Au moment de s'en servir, on trempe ce bouchon dans de la paraffine chaude et on le met en place pendant qu'il est encore couvert de paraffine fondue.

Laisser l'équilibre de température s'établir; puis relever, à 1^{mm}

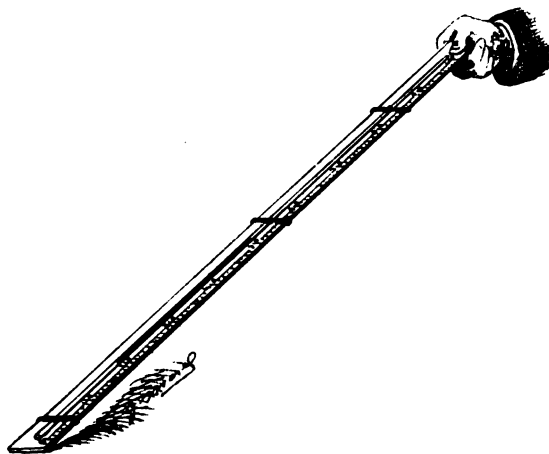
près, la longueur de la colonne d'air et la distance verticale des niveaux. — Suspendre ensuite le tube à entonnoir à différentes hauteurs et répéter les mesures pour des pressions variant de $\frac{1}{2}$ à $\frac{1}{3}$ d'atmosphère. On construira l'*isotherme* que l'on comparera avec la courbe $p\nu = \text{const.}$ (31, 33, 172).

39. Compressibilité et liquéfaction de la vapeur d'éther. — Conserver l'appareil précédent. Faire remonter le mercure jusqu'au haut du tube droit, verser quelques gouttes d'éther dans ce tube et fermer sans laisser d'air en se servant toujours du bouchon trempé dans la paraffine chaude.

Abaisser le tube à entonnoir aussi bas que possible, *et attendre que l'équilibre de température soit atteint*, puis mesurer le volume et la pression. Remonter ensuite progressivement le tube à entonnoir et mesurer les pressions exercées par la vapeur quand elle occupe un volume de plus en plus faible. On construira la courbe de compressibilité et l'on observera notamment le palier de cette courbe (pression maxima).

— Ces expériences peuvent aussi être aisément réalisées avec un tube barométrique plongeant dans le mercure ($D = 0^{\text{m}}, 8$), si l'on possède une *cuve profonde* et une quantité suffisante de mercure.

40. Autres dispositions. — 1^o On prend un tube de verre ($l = 100^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 3$); on le fixe sur un flacon tubulé comme



pour commencer la construction d'un baromètre (**III, 12**), mais, au moment de fermer le tube, on y laisse une colonne d'air

de 8^{cm}. On peut alors le retirer du flacon sans que le mercure tombe.

On retourne ce tube et, au moyen d'une légère secousse, on fait tomber une goutte de mercure au fond pour ne pas avoir à tenir compte de l'irrégularité de la pointe. On attache enfin ce tube avec des bracelets de caoutchouc le long d'un mètre en bois.

On produira les variations de pression en retournant progressivement le tube et l'on relèvera sur la règle graduée les valeurs simultanées du volume et de la pression.



On ouvrira ensuite le tube et l'on y promènera un index de mercure ($l = 5^{\text{cm}}$) dont on mesurera la longueur avec le double décimètre, en appréciant les fractions de millimètre. On se rendra compte ainsi de la correction qu'il y aurait lieu de faire pour tenir compte du défaut de cylindricité du tube (20, 68, 103, 212).

2° Dans un flacon *col droit* de 125^{cl}, contenant un peu de mercure, fixer très solidement un bouchon traversé par un robinet et par deux tubes de verre, l'un ouvert, l'autre fermé, pénétrant jusqu'au fond du flacon ($e = 100^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 7$). On reliera une pompe de bicyclette au robinet et l'on produira les variations de pression en refoulant de l'air dans le flacon (168).

41. Appareil Cailletet. — Étudier la compression de l'anhydride carbonique à 15°, à 25° et à 35° et construire les isothermes. — Pour montrer la continuité des états fluides, comprimer le gaz à 60° jusqu'à 100^{atm}, le refroidir sous pression et le détendre lentement. — On évitera d'exercer de suite une forte pression dans un tube qui vient d'être chauffé.

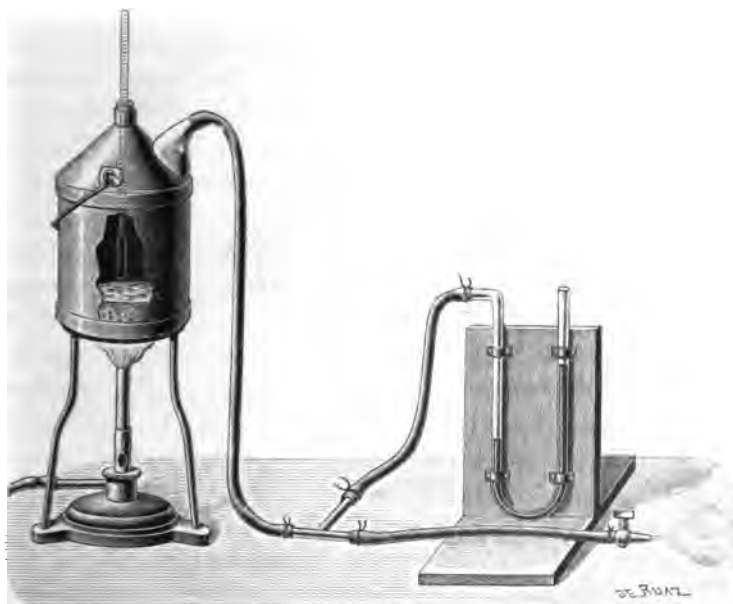
PRESSIONS MAXIMA DES VAPEURS.

42. Pressions maxima de la vapeur d'éther. — *Montage.* — Construire un baromètre (III, 12) avec un tube de verre bien sec ($l = 100^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 4$) et un flacon tubulé ($V = 250^{\text{cm}^3}$). Verser, par la tubulure, environ 50^{cm} d'alcool

ou d'éther dans le flacon. Mettre dans cette tubulure un tube de verre ($l = 10^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}},7$) courbé à angle droit, étiré en pointe et fixé dans un bouchon de liège extra-fin.

Chauffer alors l'appareil en le plaçant d'abord dans de l'eau tiède, puis dans de l'eau chaude (60°) et le porter enfin dans de l'eau bouillante. L'alcool se met à bouillir; on le laisse bouillir pendant environ une minute, en surveillant la colonne de mercure pour éviter la production d'une pression excessive, puis on retire l'appareil de l'eau bouillante. L'ébullition de l'alcool continue quelques instants; et l'on ferme à la flamme la pointe du tube de dégagement au moment même où l'ébullition s'arrête.

Expériences. — Maintenir l'appareil quelques minutes dans une conserve ($V = 2^{\text{l}}$) contenant de l'eau à la



température du laboratoire, et lire la pression de la vapeur à l'aide d'un double décimètre placé verticalement contre le flacon.

Pour faire cette lecture, on aura soin de placer successivement l'œil à la hauteur de chacun des points visés. On répétera l'expérience à différentes températures en mettant de l'eau de plus en plus chaude dans la conserve et l'on construira la courbe des pressions maxima de la vapeur en fonction de la température.

Pour des pressions atteignant et dépassant notablement la pression atmosphérique, on emploiera le dispositif indiqué en thermométrie comme appareil à point 100 (IV, 5). On mettra de l'alcool dans la chaudière au lieu d'eau, et l'on chauffera au bain-marie. *On ne doit jamais chauffer à feu nu un liquide combustible.*

— Si l'on dispose d'un thermomètre permettant de lire au moins les centièmes de degré, on pourra constater que la température d'ébullition sous la pression atmosphérique varie d'une quantité très appréciable quand on fait seulement intervenir la différence de pression qui existe entre deux étages d'une maison (hypsomètre).

43. Pression maxima de la vapeur d'éther dans l'air. —

Mettre du mercure ($h = 2^{\text{cm}}$) dans un flacon tubulé ($V = 250^{\text{cm}^3}$); fixer un tube de verre droit ($l = 50^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}$, 7) dans le goulot du flacon, ajuster un robinet en verre dans la tubulure et mettre sur ce robinet un bout de tube de caoutchouc (feuille anglaise, $l = 8^{\text{cm}}$; $D = 0^{\text{cm}}$, 8). — Les joints de l'appareil devront être faits très soigneusement.



Placer le tout pendant plusieurs minutes dans un bain d'eau à la température du laboratoire en laissant le robinet ouvert, puis fermer le robinet et remplir d'éther le tube de caoutchouc qu'on fermera avec un bouchon. Ouvrir ensuite le robinet et faire pénétrer l'éther dans le flacon en pressant sur le caoutchouc et refermer le robinet.

Attendre encore quelques minutes pour que le mercure atteigne sa position d'équilibre; marquer le niveau du mercure avec un morceau de papier gommé, que l'on colle sur le tube manométrique et retirer l'appareil du bain d'eau. — On mesurera, avec une règle verticale et une équerre, la hauteur de la colonne de mercure soulevée. Cette hauteur est-elle égale à celle qui mesure la pression maxima de la vapeur d'éther pure? (41).

44. Pression maxima de la vapeur d'éther dans l'air raréfié. — Construire un baromètre (III, 12), comme pour l'expérience précédente, et munir la tubulure du flacon d'un robinet. Relier ce flacon à une pompe à eau ou à une machine pneumatique par un caoutchouc à vide; faire le vide aussi complet que possible, en notant la pression résiduelle indiquée par le baromètre. Coiffer ensuite le robinet d'un bout de tube de caoutchouc, y mettre de l'éther et continuer comme dans l'expérience précédente. L'évaporation de l'éther est-elle plus rapide? la pression maxima est-elle la même?

45. Vapeur sursaturée. — *Montage.* — Dans l'une des tubulures d'un flacon à deux tubulures ($V = 1^l, 5$) ajuster un tube en S ($d = 0^{\text{cm}}, 7$; $3l = 45^{\text{cm}}$) formant manomètre à mercure. Dans l'autre tubulure et dans le goulot, fixer deux tubes droits ($d = 0^{\text{cm}}, 7$; $l = 8^{\text{cm}}$; $l = 25^{\text{cm}}$) débouchant l'un en haut, l'autre au fond du flacon, et placer un tampon d'ouate dans le tube court.

Expériences. — Le flacon devra être rempli d'air filtré à travers le tampon d'ouate. Pour cela on le remplira d'abord avec de l'eau et l'on siphonnera cette eau au moyen d'un tube de caoutchouc ($d = 0^{\text{cm}}, 8$; $l = 50^{\text{cm}}$), adapté au tube qui plonge au fond du flacon. — Ceci fait, adapter ce même caoutchouc au tube qui contient le tampon d'ouate et fermer l'autre tube avec le doigt, ou avec un tube de caoutchouc muni d'une pince.



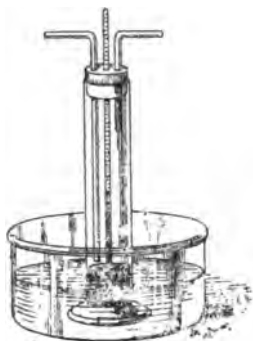
Refouler de l'air à travers le tampon d'ouate, pincer le tube par lequel on a soufflé et lire la pression indiquée par le manomètre.

Mettre alors brusquement le flacon en communication avec l'atmosphère et constater qu'il ne se forme aucun brouillard. On n'aperçoit rien, même en éclairant le flacon latéralement et en le regardant sur un fond noir.

Déboucher ensuite le flacon et y introduire un peu de fumée de tabac, ou de la fumée de chlorure d'ammonium. Répéter l'expérience et constater qu'il se forme toujours un brouillard, même pour les détentes les plus faibles (64, 107, 126, 184).

HYGROMÉTRIE.

46. Détermination d'un point de rosée ⁽¹⁾. — *Montage.* — Mettre environ 1^{te} de mercure dans une éprouvette à pied de 250^{cm}³ (diamètre intérieur 3^{cm}). Fermer l'éprouvette par un bouchon traversé par un thermomètre qui plonge dans le mercure, et par deux tubes de verre courbés à angle droit ($d = 0^{\text{cm}}, 7$) dont l'un débouche en haut de l'éprouvette, tandis que l'autre arrive près de la surface du mercure. Au moyen d'un tube de caoutchouc, ce dernier tube sera mis en communication avec le lieu où doit se faire la prise d'air.



Expériences. — Refroidir l'éprouvette en la plaçant dans un cristalliseur contenant de l'eau glacée ou un mélange réfrigérant dont le niveau ne dépasse pas celui du mercure de l'éprouvette.

On agitera doucement et l'on suivra la température du mercure, en aspirant de temps en temps par le petit tube coudé, jusqu'au moment où un dépôt de rosée se fera sur le mercure. On laissera alors l'appareil se réchauffer, et l'on notera la température de disparition de la rosée. On obtiendra, naturellement, une meilleure détermination du *point de rosée* si l'on répète l'expérience en refroidissant plus lentement. — On déterminera de cette manière le point de rosée de l'air pris soit dans la salle, soit au dehors, et de l'air qui aura barboté dans un flacon laveur contenant de l'eau (13).

47. Psychromètre. — Suspendre deux thermomètres côte à côte, après avoir recouvert le réservoir de l'un d'eux d'une chemise de mousseline. — Maintenir la mousseline mouillée en y déposant de temps en temps une goutte d'eau et noter l'écart de température des thermomètres. Comment cet écart de température varie-t-il quand, avec un éventail, on agite l'air plus ou moins vite près des thermomètres? Répéter l'expérience en suspendant les

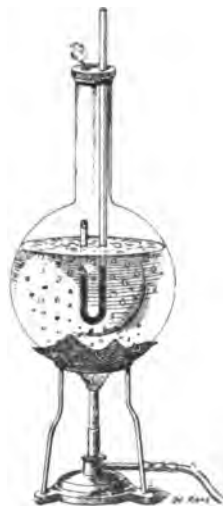
(1) Le procédé hygrométrique le plus employé dans les filatures consiste à suspendre un écheveau de laine à une balance : la laine est d'autant plus lourde que l'air est plus humide (66, 151).

deux thermomètres dans un seau au fond duquel on aura mis un peu d'eau. Y a-t-il encore un écart de température ? (13).

ÉBULLITION.

48. Ébullition normale. — Faire bouillir de l'eau dans un ballon de verre ($V = 2^l$). Au bout de quelques minutes d'ébullition, constater la persistance des points de formation des bulles, puis l'ébullition irrégulière et l'élévation de la température. Amorcer les bulles avec de la grenaille de zinc, ou envoyer un courant d'air modéré au moyen d'un tube de verre ($d = 0^m, 7$) étiré en pointe. La température retombe-t-elle à sa valeur normale pour s'y maintenir ensuite ?

49. Pression de la vapeur saturante à la température d'ébullition. — Préparer un tube en J ouvert aux deux bouts ($L = 30^m, 8$; $l = 10^m, 5$; $d = 0^m, 8$; écartement $1^m, 5$); y verser du mercure de manière à avoir une colonne de 5^m dans chaque branche, et achever de remplir la petite branche avec de l'eau. Chauffer cette eau et la faire bouillir un instant; incliner ensuite le tube pour que le mercure occupe presque toute la longueur de la petite branche, en ne conservant que 1^m ou 2^m d'eau, et fermer alors la petite branche avec un bouchon de liège *extra-fin*, sans laisser d'air.

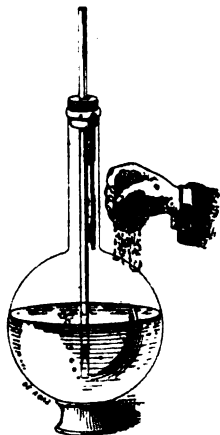


Le tube étant ainsi préparé, on l'ajuste dans un bouchon plat que l'on pose sur l'ouverture du col d'un ballon plein d'eau ($V = 3^l$). Ce bouchon est percé d'une ouverture pour l'échappement de la vapeur.

Lorsque l'on chauffe et que l'on arrive près de la température d'ébullition, l'eau se vaporise dans le tube. Au moment même de l'ébullition, le mercure se place au même niveau dans les deux branches, et il s'y maintient tant qu'il ne se produit pas de surchauffe de l'eau qui bout dans le ballon (143, 151).

50. Ébullition sous pression réduite. — Laver un ballon à long col ($V = 1^l$) avec de l'acide sulfurique tiède et le rincer à

l'eau filtrée. Préparer une petite cloche ($l = 3^{\text{cm}}$) par étranglement d'un tube de verre ($d = 0^{\text{cm}}, 7$) et l'ajuster dans un bouchon de caoutchouc.

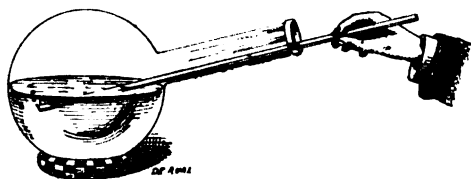


— Faire bouillir de l'eau dans le ballon pendant quelques instants et placer le tube à cloche dans le ballon sans enfoncer le bouchon. Éteindre alors le feu et fermer franchement quand le dégagement de vapeur est sur le point de s'arrêter.

L'ébullition, alimentée par l'air de la petite cloche, se continue pendant toute la durée du refroidissement. — On active l'ébullition en versant de l'eau froide sur le ballon; on l'arrête, au contraire, en y versant de l'eau chaude (60, 63, 64, 66).

51. Ébullition d'un ensemble de deux liquides à une température plus basse que le plus bas des points d'ébullition. — Chauffer de l'essence de térébenthine à 95° dans un tube de verre très propre placé dans un ballon plein d'eau (IV, 53). Introduire dans le tube une petite cloche (IV, 50) contenant une bulle d'air avec quelques gouttes d'eau : l'ébullition se produira, grâce à l'addition des pressions de vapeur (60).

52. Surchauffe de l'eau. — Laver un ballon ($V = 1^{\text{l}}$) avec de l'acide sulfurique tiède, le rincer à l'eau, puis le remplir aux deux tiers d'eau distillée filtrée. Faire bouillir cette eau pendant



plusieurs minutes, arrêter l'ébullition pendant quelques instants, chauffer de nouveau en suivant la température de l'eau et éteindre le feu quand on aura dépassé 100° . — On pourra rétablir l'ébullition *sans chauffer*, en introduisant dans l'eau une petite cloche à air (IV, 50) ou bien en y projetant de la limaille de fer. On constatera que l'eau revient alors à sa température normale d'ébullition (60).

53. Surchauffe de divers liquides. — Préparer un tube de verre fermé ($l = 40^{\text{cm}}$; $D = 1^{\text{cm}}$, 8). Laver ce tube avec de l'acide sulfurique tiède, rincer à l'eau distillée filtrée et à l'alcool filtré, puis faire égoutter. Disposer ce tube avec un thermomètre dans un bouchon ajusté sur un ballon de 2 ou 3 litres contenant de l'eau, introduire le liquide étudié dans le tube au moyen d'un entonnoir à filtre et chauffer le ballon.

Si l'ébullition normale se produit, on la laisse durer quelques instants et l'on retire le tube du ballon pour un moment. En le replaçant dans le ballon quand l'ébullition aura cessé, la surchauffe se produira presque à coup sûr.

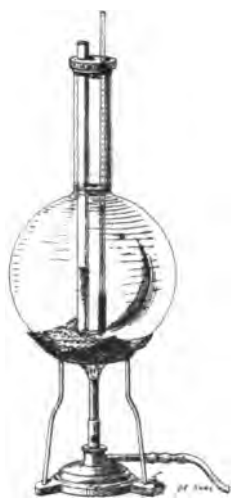
Avec ces précautions, on peut surchauffer d'une vingtaine de degrés l'alcool, l'éther, le chloroforme, le sulfure de carbone, la benzine, etc. (60, 77).

54. Surchauffe du chlorure de méthyle. — Nettoyer un tube de verre ($d = 0^{\text{cm}}$, 8; $l = 100^{\text{cm}}$) avec de l'acide sulfurique tiède, de l'eau et de l'alcool, puis le fermer à un bout. Avec un entonnoir à filtre, faire couler le long de la paroi du chlorure de méthyle liquide, de manière à remplir un quart de la longueur du tube.

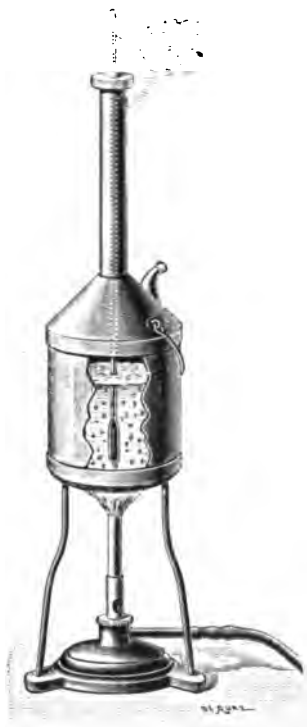
Aucune ébullition ne se produit et le liquide peut être conservé à la température ambiante. Mais la surchauffe cesse si l'on fait vibrer longitudinalement le tube avec les doigts mouillés d'alcool : tout le liquide est brusquement soulevé par les bulles de vapeur et sa température redescend à -23° (60).

55. Tonométrie. — *Montage.* — Prendre l'appareil à point 100 muni du tube qui forme chemise de vapeur autour de la tige du thermomètre (IV, 5). Mettre au fond du vase des fragments de verre cassé sur une épaisseur de 2^{cm} et verser un volume connu d'eau (500^{cm^3}) dans la chaudière. On emploiera, si possible, un thermomètre permettant de lire mieux que les dixièmes de degré et on le placera de manière que le réservoir plonge au milieu du liquide.

Expériences. — Mettre dans l'eau un poids connu de sucre (environ $\frac{1}{20}$ de molécule-gramme par 100^{g} d'eau) et prendre la température d'ébullition. On évitera une ébullition trop vive et trop prolongée pour ne pas augmenter la concentration.



Ajouter ensuite une nouvelle dose de sucre, prendre la température d'ébullition et continuer ainsi jusqu'à une concentration d'environ $\frac{1}{3}$ de molécule-gramme par 100^e d'eau, — puis construire la courbe des élévations *moléculaires* du point d'ébullition en fonction de la concentration.



Quand l'expérience est terminée, on vide la chaudière alors que le liquide est encore bouillant, et on la lave à l'eau chaude, afin qu'il ne s'y produise pas de cristallisation.

— On répétera l'expérience avec de l'*acide borique*, en employant les mêmes concentrations moléculaires, et l'on comparera les élévations moléculaires du point d'ébullition dans les deux expériences.

— On fera aussi une mesure avec une solution de *chlorure de sodium* à 10 pour 100 pour constater l'élévation anormale de la température d'ébullition (92, 99).

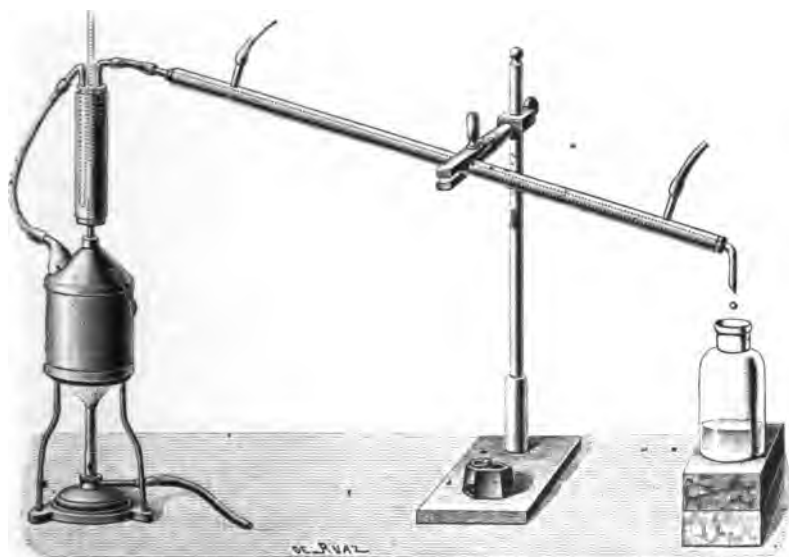
56. Distillation et rectification d'un mélange alcoolique. — *Montage.* — On peut prendre comme *chaudière* un bidon à essence ($V = 1^l$). Le *rectificateur* est constitué par un tube de laiton ($l = 15^{\text{cm}}$, $d = 4^{\text{cm}}$, $e = 0^{\text{cm}}, 05$) fermé par deux bouchons bien étanches.

Le bouchon inférieur est traversé en son milieu par le tube de retour du liquide ($l = 22^{\text{cm}}$, $d = 0^{\text{cm}}, 7$). Le bouchon supérieur est traversé par le thermomètre et par le tube de dégagement courbé à angle droit ($2l = 20^{\text{cm}}$, $d = 0^{\text{cm}}, 7$), qui part de la partie supérieure du tube métallique. On fixe aussi dans ce bouchon le tube d'arrivée de la vapeur, courbé à angle aigu ($L = 25^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 7$), qui pénètre, au contraire, jusqu'au fond.

La condensation se fait dans un réfrigérant descendant. C'est un tube de laiton ($l = 80^{\text{cm}}$; $d = 1^{\text{cm}}, 7$; $e = 0^{\text{cm}}, 05$) vers les bouts duquel on soude deux tubulures latérales ($l = 5^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 8$). Sur

ces tubulures, on ajuste des tubes de caoutchouc pour la circulation d'eau. Aux deux extrémités du tube de laiton, on fixe des bouchons, à travers lesquels on fait passer un tube de verre ($l = 100^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 7$) qui a été courbé à angle obtus à quelques centimètres de l'un des bouts.

Expériences. — Remplir aux trois quarts la chaudière avec un mélange alcoolique (à 10 pour 100). Mettre le rectificateur en place en le reliant à la chaudière par le tube de reflux du liquide, qui part du fond de la chaudière, traverse le bouchon qui en ferme le goulot et pénètre de 3^{cm} dans le rectificateur. Relier aussi la tubulure de la chaudière et le tube qui doit amener la vapeur dans le rectificateur, au moyen d'un tube de caoutchouc (feuille anglaise, $d = 0^{\text{cm}}, 8$) ligaturé avec du fil de cuivre ($d = 0^{\text{cm}}, 1$).



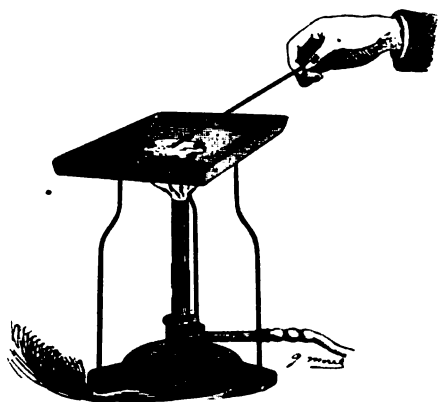
Le réfrigérant, tenu par un support à pince, étant enfin relié au tube de dégagement, on porte le liquide à l'ébullition et l'on recueille les produits de condensation en séparant la *tête* et la *queue* de la distillation.

Pour le réglage du feu, on commence par prendre la flamme la plus basse qui produise une distillation, on observe le thermomètre et l'on augmente progressivement le chauffage tant que le thermomètre ne monte pas notablement. — On suit le thermomètre pendant toute la durée de la rectification, en ayant soin de

diminuer progressivement le feu. On se considère comme arrivé aux queues de distillation quand on ne peut plus obtenir de distillation sans faire monter le thermomètre de plusieurs degrés au-dessus du point d'ébullition de l'alcool.

On prendra à l'alcoomètre le titre du *cœur* de distillation. On se rendra compte de l'utilité du rectificateur en le supprimant pour distiller une nouvelle dose de liquide alcoolique. Pour cette dernière expérience, le thermomètre sera placé dans le goulot de la chaudière et l'on reliera directement la tubulure au réfrigérant.

57. Caléfaction. — Découper une plaque de cuivre ($8^{\text{cm}} \times 8^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}}, 1$) : y percer quelques trous ($d = 0^{\text{cm}}, 2$), et en



redresser légèrement les bords avec une pince pour former une sorte de coupe.

Chauffer cette plaque au rouge sombre sur un bec Bunsen. Verser quelques gouttes d'eau dans la coupe et constater que le liquide ne passe pas à travers les trous de la plaque, et se rassemble en un globule constamment agité.

Pour apprécier la température du liquide, on formera une goutte large et l'on y introduira le réservoir d'un petit thermomètre. On pourra aussi y placer une petite cloche à air ($l = 1^{\text{cm}}$) obtenue par étranglement à l'extrémité d'un tube de verre ($d = 0^{\text{cm}}, 3$) et l'on constatera que l'ébullition ne se produit pas.

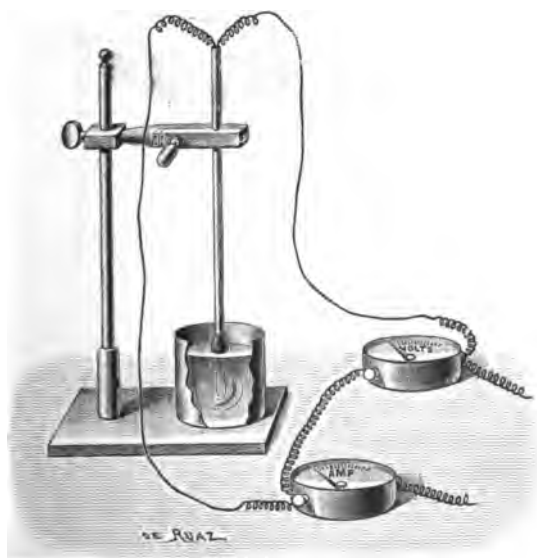
Si on laisse alors la plaque se refroidir, on observe une volatilisation très rapide du liquide lorsque le contact avec la plaque chaude se produit.

— L'expérience étant faite ensuite avec de l'eau acidulée, on essayera de faire passer le courant d'une sonnerie électrique entre deux fils métalliques dont l'un est en contact avec la plaque et dont l'autre plonge dans la goutte en caléfaction.

ÉQUIVALENT MÉCANIQUE DE LA CALORIE.

58. Expériences qualitatives. — Échauffement d'un manche d'outil frotté énergiquement sur la table. — Échauffement d'un clou arraché d'une planche un peu épaisse : évaluer le travail d'arrachement. — Retirer l'hélice d'un ventilateur électrique, faire tourner le moteur, serrer le bout d'arbre entre les mâchoires d'une pince, et constater son rapide échauffement. — Échauffement du plomb martelé. — Échauffement du mercure violemment agité dans un flacon. — Effets thermiques du courant fourni par une machine Gramme, etc. (72).

59. Mesure de l'équivalent mécanique : procédé électrique; évaluation directe d'une quantité de chaleur en ergs. — Immerger une lampe à incandescence (16 ou 32 bougies)



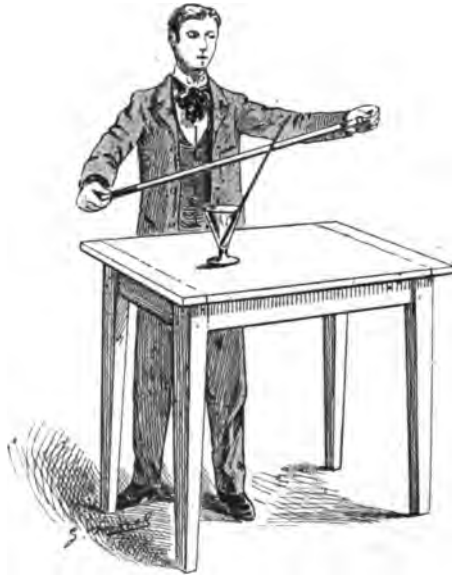
dans un calorimètre contenant environ un demi-litre d'eau. Pour

éviter le contact des fils conducteurs avec l'eau, on les fera passer dans un tube de verre mastiqué sur la lampe.

Mesurer l'intensité et le voltage de la lampe avec un ampère-mètre et un voltmètre, et déterminer l'échauffement du calorimètre au bout de trois minutes, en appréciant les dixièmes de degré. Calculer l'équivalent mécanique de la calorie. Y a-t-il lieu de tenir compte de la capacité calorifique de la lampe ?

— On mesurera, par le même procédé, la chaleur spécifique *absolue* d'un liquide quelconque (essence de térébenthine) en mettant ce liquide au lieu d'eau dans le calorimètre.

60. Mesure de l'équivalent mécanique : frottement. — Se procurer un tube de verre ($l = 100\text{cm}$; $d = 3\text{cm}$; $e = 0\text{cm}, 2$),



y mettre environ 1^{kg} de mercure, boucher les deux extrémités, et promener le mercure dans le tube de verre pour égaliser les températures. Verser le mercure dans un verre, prendre sa température au dixième de degré, et replacer le mercure dans le tube de verre.

Retourner brusquement le tube une cinquantaine de fois, en ayant soin de le manœuvrer par les bouchons pour ne pas l'échauffer avec les mains. Vider alors rapidement le mercure et prendre sa

température. On déterminera enfin le poids du mercure et du tube de verre et l'on déduira de ces mesures la valeur de l'équivalent mécanique de la calorie.

— Faire une expérience analogue avec de la grenaille de plomb : trouve-t-on la même valeur de l'équivalent mécanique? La précision des mesures de masses, de longueurs et de températures permet-elle de répondre du dixième ou du centième sur l'équivalent mécanique de la calorie? (151, 208).

CHALEURS SPÉCIFIQUES.

61. Chaleur spécifique de l'eau. — Tarer un vase en métal mince (boîte en fer-blanc, $V = 1^l$); y verser 500^g d'eau et en prendre la température, en appréciant les fractions de degré.



Faire d'autre part bouillir de l'eau, verser environ 500^g d'eau *bouillante* dans le vase calorimétrique, agiter avec le thermomètre, lire rapidement la température finale, et déterminer l'augmentation de poids du calorimètre.

L'expérience permet-elle de reconnaître s'il y a une différence de 2 pour 100 entre les chaleurs spécifiques de l'eau chaude et de l'eau froide? A ce degré de précision, est-il nécessaire de mesurer directement la capacité calorifique du calorimètre? (110, 111).

62. Chaleur spécifique du mercure. — Mettre un poids connu de mercure (400^g) dans un vase à filtrations chaudes ($V = 250^{\text{cm}^3}$) et noter sa température en appréciant les dixièmes

de degré. Mettre aussi 400^g de mercure dans un vase semblable que l'on placera pendant quelques minutes dans de l'eau bouillante. Prendre la température du mercure chaud, le verser dans le mercure froid, agiter, et prendre rapidement la température finale. La chaleur spécifique du mercure varie-t-elle notablement avec la température?

Opérer de même en versant les 400^g de mercure chaud dans environ 200^g d'eau à la température ambiante. Quelle est la chaleur spécifique du mercure?

— On pourra mesurer, d'une manière analogue, la chaleur spécifique de l'essence de térébenthine en y versant environ moitié de son poids d'eau chaude (101, 110, 111, 157).

63. Chaleur spécifique d'un solide. — Préparer encore 500^g d'eau dans le calorimètre et faire reposer celui-ci sur un *valet* ou sur trois petits bouchons à l'intérieur d'une boîte en fer-blanc un peu plus grande.

Attacher un poids en laiton de 1^{kg} à un fil, et le mettre pendant quelques minutes dans de l'eau bouillante, dont on prendra la température. Sortir le *poids*, l'égoutter rapidement dans la vapeur et le mettre dans le calorimètre. Agiter avec le poids et le thermomètre, et noter la température finale; observer ensuite le refroidissement pendant quelques minutes. On déduira de ces mesures la valeur de la chaleur spécifique du laiton (1).

Estimer les corrections qu'il y aurait lieu de faire pour tenir compte du refroidissement et de l'eau chaude apportée avec le poids : peut-on négliger ces corrections?

— Répéter l'expérience avec un morceau de fer (1^{kg}) et avec un bloc de plomb (2^{kg}). Comparer ensuite les produits des chaleurs spécifiques par les poids atomiques de ces différents corps (22, 79, 103, 111, 172).

64. Détermination calorimétrique d'une haute température. — Répéter l'expérience précédente avec un morceau de fer ($P = 100^g$) attaché à un fil métallique ($d = 0^m, 1$) et que l'on chauffera pendant un même temps (5 minutes) : 1^o dans la flamme d'un bec Bunsen; 2^o dans la flamme du chalumeau qui sert au

(1) Les poids dits *en laiton* du commerce ont souvent une chaleur spécifique moyenne assez faible, voisine de 0,4. Ils sont, en effet, formés principalement d'une masse de plomb qui n'est recouverte que par une enveloppe de laiton assez mince.

travail du verre (I, 37). On calculera les températures auxquelles les deux flammes ont pu porter le bloc de fer, en admettant que la chaleur spécifique du fer soit constante.

CHALEURS DE FUSION, DE DISSOLUTION, DE RÉACTION ET DE VAPORISATION.

65. Fusion de la glace. — Concasser grossièrement de la glace et l'humecter d'eau. Mettre un poids connu (500^g) d'eau à environ 20° dans un calorimètre constitué, par exemple, par une boîte en fer-blanc de 1 litre, reposant sur du tube de caoutchouc dans une boîte un peu plus grande et déterminer le poids total à un décigramme près. — Noter la vitesse de refroidissement. — Prendre un morceau de glace (30^g), le sécher rapidement et le mettre dans l'eau, agiter pendant la fusion et noter la température finale, puis observer la nouvelle vitesse de refroidissement et déterminer l'augmentation de poids du calorimètre.

On estimera la perte de chaleur en admettant une vitesse de refroidissement moyenne. Y a-t-il lieu de tenir compte de cette perte dans le calcul de la chaleur de fusion de la glace?

66. Chaleur de dissolution. — Dans un vase à filtrations chaudes contenant 500^g d'eau, ajouter des poids croissants de nitrate d'ammonium et construire la courbe des abaissements de température en fonction de la concentration.

67. Chaleur de réaction. — Mettre une petite fiole à fond plat ($V = 50^{\text{cm}^3}$) dans le calorimètre. Verser dans cette fiole 20^{cm³} d'une solution concentrée de potasse additionnée d'un réactif coloré. Neutraliser soit avec de l'acide chlorhydrique, soit avec de l'acide acétique employés en dissolutions équimoléculaires, et comparer les quantités de chaleur dégagées.

— Mesurer, de même, la chaleur d'hydratation de l'acide sulfurique *en versant l'acide dans l'eau.*

68. Utilisation de la chaleur fournie par un brûleur. — Chauffer, sur un brûleur à gaz, une bouillotte contenant une quantité d'eau mesurée (1^l). Agiter l'eau avec un thermomètre dont on suivra la température en appréciant les dixièmes de degré et noter en même temps les débits de gaz indiqués par le tambour gradué du compteur.

Laissant le débit du gaz constant, on construira la courbe des quantités de chaleur utilisées en fonction du temps, puis en fonction des quantités de gaz brûlées : A quel moment l'utilisation du gaz est-elle la meilleure? Utilise-t-on une fraction considérable de la chaleur de combustion?

On fera plusieurs expériences analogues avec de l'eau prise toujours à une même température, mais en augmentant progressivement le débit; et l'on comparera les quantités de chaleur utilisées par l'eau sous les différents régimes : quel est le régime le plus économique?

— Prolonger l'une de ces expériences jusqu'à produire l'ébullition de l'eau pendant plusieurs minutes et calculer la chaleur de vaporisation de l'eau en la déduisant de la quantité de gaz brûlée et de la quantité d'eau vaporisée. — On évaluera d'une manière analogue la chaleur de fusion de la glace.

— Répéter ces expériences en chauffant la même bouillotte sur un brûleur à alcool ou à pétrole dont on déterminera le débit par des pesées.

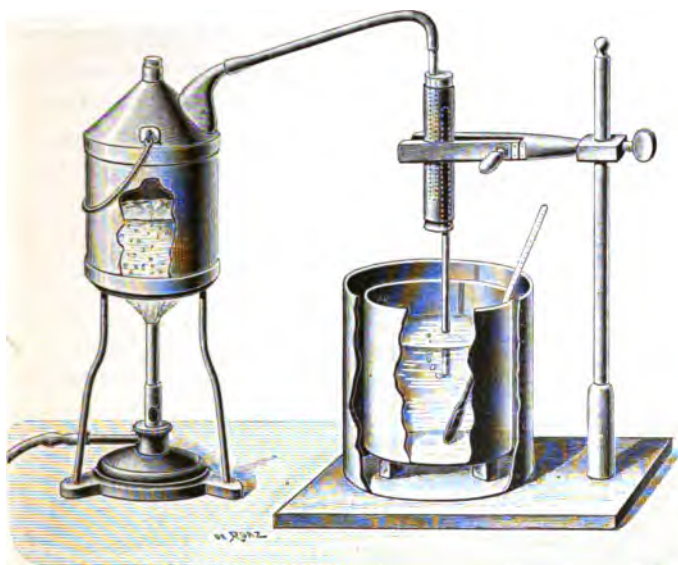
Le chauffage au pétrole ou à l'alcool est-il plus économique que le chauffage au gaz? (174, 197, 200).

69. Chaleur de vaporisation de l'eau. — *Montage.* — A défaut d'un calorimètre en laiton mince, se procurer une boîte cylindrique en fer-blanc ($V = 1^l$) et une autre boîte un peu plus grande. Préparer d'autre part une petite chaudière (bidon à essence) contenant de l'eau.

— Construire enfin un *sécheur de vapeur* formé d'un tube ($l = 10^{\text{cm}}$; $d = 3^{\text{cm}}$, 5), fermé par deux bouchons traversés chacun par un tube de verre ($l = 20^{\text{cm}}$ et 15^{cm} ; $d = 0^{\text{cm}}$, 8) pénétrant profondément dans le tube de métal. Le tube par où la vapeur se rend dans le calorimètre doit être taillé en biseau. — Fixer ce sécheur dans la pince d'un support, immédiatement au-dessus du calorimètre, et le relier à la chaudière par un tube de caoutchouc aussi court que possible ($l = 30^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}$, 8).

Expériences. — Faire bouillir l'eau de la chaudière en inclinant le sécheur de façon à envoyer le jet de vapeur loin du calorimètre. Peser le calorimètre, avec son thermomètre, y mettre environ 800^g d'eau et peser de nouveau au décigramme. — Mettre le calorimètre en place et noter la température en appréciant les fractions de degré.

Envoyer dans l'eau un rapide courant de vapeur, de manière à élever sa température d'environ 20° en deux minutes; puis éteindre le feu, soulever et éloigner le tube amenant la vapeur, agiter rapidement avec le thermomètre et lire la température finale



au dixième de degré. Peser enfin le calorimètre pour déterminer le poids de l'eau condensée et calculer tout d'abord la chaleur de vaporisation de l'eau sans faire aucune correction.

1° — Au degré de précision des mesures (1 pour 100) y a-t-il lieu de tenir compte de la capacité calorifique du calorimètre et du poids de l'eau qui a pu rester adhérente au tube qui amenait la vapeur?

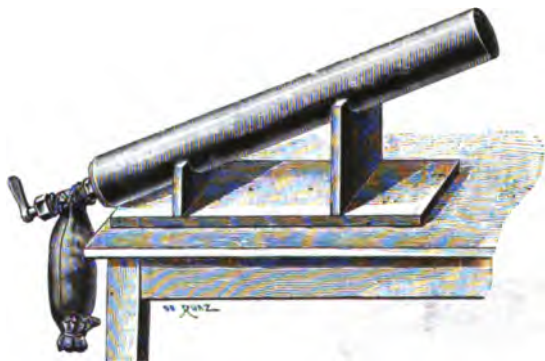
2° — Chercher expérimentalement s'il y a lieu de tenir compte de la chaleur que le sécheur de vapeur peut envoyer au calorimètre par rayonnement. Pendant cet essai, on enverra le courant de vapeur loin du calorimètre en le recevant, à sa sortie du sécheur, dans un tube de verre coudé à angle droit et suivi d'un tube de caoutchouc.

3° — Mesurer la vitesse de refroidissement du calorimètre pris à la température finale. Y a-t-il lieu de tenir compte de la chaleur qui a pu être perdue ainsi pendant la mesure?

4° — Le calorimètre étant pris à la température finale, agiter

continuellement l'eau en pesant l'appareil de minute en minute. Y a-t-il une évaporation suffisante pour qu'il y ait lieu de tenir compte de la perte d'eau qui a pu se produire entre la fin du courant de vapeur et l'instant de la pesée? (173, 176).

70. Refroidissement par la vaporisation adiabatique. — *Préparation de la neige carbonique.* — Placer une bouteille d'anhydride carbonique liquide sur un support incliné, le robinet en bas. Couvrir étroitement l'échappement avec un double sac



presque imperméable (sac à écus, ou manche de vêtement nouée) et ouvrir franchement le robinet pendant quelques secondes : le sac se remplit de neige.

On peut faire cette expérience à toute petite échelle en ouvrant l'un de ces globules contenant de l'anhydride carbonique liquide, qui se vendent pour la fabrication domestique des boissons gazeuses (126).

Expériences diverses. — Faire un mélange de neige carbonique et d'acétone (ou d'éther, d'alcool, etc.). Prendre sa température avec un thermomètre à toluène. — Verser un peu de ce mélange sur du mercure : congélation du mercure, marteler ce métal. — Essayer de congeler différents liquides que l'on placera dans des tubes à essais (alcool, pétrole, glycérine, brome, etc.). Essayer notamment de congeler un mélange de 3^{vol} d'acide chlorhydrique et de 1^{vol} d'eau. — Essayer l'action de ce mélange chlorhydrique refroidi sur une parcelle de sodium ou sur un morceau de fer. — Constaté l'existence de la vapeur d'eau dans l'air en envoyant cet air, même desséché chimiquement, dans un tube

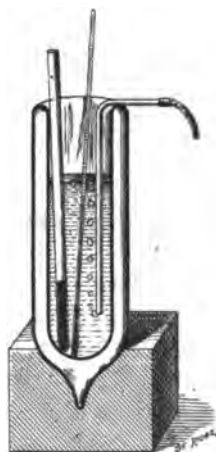
en U refroidi par de la neige carbonique. — Envoyer un courant de gaz d'éclairage dans un tube à essais refroidi par de la neige carbonique : recueillir les produits de condensation. L'odeur du gaz sortant est-elle altérée? — Envoyer un courant de gaz ammoniac sec dans le tube refroidi, et constater la liquéfaction de ce gaz. — Refroidir un morceau de tube de caoutchouc dans de la neige carbonique. Ses propriétés élastiques sont-elles altérées? — Constater, de même, que le plomb plongé dans la neige carbonique devient élastique et cassant comme de l'acier. — Mesurer la résistance électrique d'une hélice de fil de cuivre refroidie par la neige carbonique.

— Ces expériences se font d'une manière encore plus parfaite avec de l'air liquide que l'on peut, maintenant, se procurer dans le commerce à un prix très bas, à peine supérieur à celui de l'anhydride carbonique liquéfié (87, 167).

71. Évaporation de l'éther et de l'eau. — Verser 20^{cm} d'éther dans un tube *vacuum* (tube à double paroi avec vide intérieur); mettre dans l'éther un thermomètre et un tube à essais ($d = 1^{\text{cm}}$) en verre mince contenant quelques grammes d'eau. — A l'aide d'un soufflet et d'un tube de verre, envoyer un courant d'air dans l'éther : observer la marche du thermomètre et constater la congélation de l'eau.

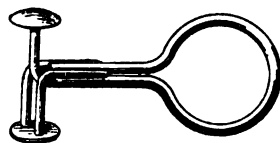
— Placer un verre de pendule *mince* (ou le fond d'un ballon) sur un bouchon plat, verni ou paraffiné. On met quelques gouttes d'eau entre le verre et le bouchon, on verse de l'éther dans le verre concave et l'on en active l'évaporation par un courant d'air. — On pourrait encore mettre de l'éther dans un pulvérisateur et congeler de l'eau contenue dans un tube à essais en plaçant celui-ci dans le jet d'air et d'éther. — Entourer le réservoir d'un thermomètre avec un peu d'ouate mouillée d'éther et constater l'influence des moindres courants d'air sur le refroidissement obtenu (22, 63, 77).

Vaporisation de l'eau dans le vide. — Frapper une carafe avec la machine pneumatique.



COMPRESSION ET DÉTENTE ADIABATIQUE D'UN GAZ.

72. Mesure des variations de température et calcul du rapport des chaleurs spécifiques. — *Montage.* — Se procurer une bouteille ou une bonbonne d'une dizaine de litres de capacité et ajuster soigneusement dans le goulot un bouchon tra-



versé par deux tubes de verre. Le premier est droit ($d = 0^{\text{cm}}, 7$, $l = 10^{\text{cm}}$) et coiffé d'un tube de caoutchouc (feuille anglaise, $d = 0^{\text{cm}}, 8$; $l = 20^{\text{cm}}$) fermé par une pince à ressort. Le second tube de verre est en forme de S et constitue un manomètre à eau ($3l = 60^{\text{cm}}$, $d = 0^{\text{cm}}, 7$) dont on lira les dénivellations sur un double décimètre fixé le long de ce tube au moyen de bracelets de caoutchouc.

Expériences. — Aspirer ou refouler de l'air par le tube de caoutchouc, de manière à obtenir une dénivellation d'au moins 10^{cm} . Si l'on veut refouler de l'air on se servira d'une poire en caoutchouc ou d'un soufflet, mais on ne soufflera pas avec la bouche pour ne pas introduire d'humidité.

Attendre plusieurs minutes pour que l'équilibre de température soit rétabli et noter la dénivellation à un demi-millimètre près. — Ouvrir ensuite la pince qui serre le caoutchouc, rétablir la pression atmosphérique, et refermer aussitôt cette pince. Attendre encore quelques minutes pour l'égalisation des températures et lire la nouvelle dénivellation.

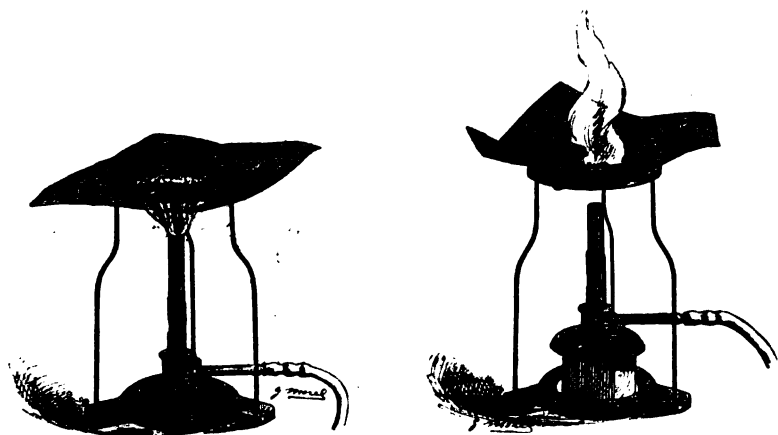
Déduire de ces mesures la valeur du rapport $\frac{C}{c}$ et calculer les variations de température qui se sont produites.

La précision des mesures et la concordance des résultats nécessitent-elles que l'on tienne compte de la variation de volume due au déplacement de l'eau dans le manomètre? Peut-on calculer l'expérience en considérant les variations de pression comme infiniment petites? Faut-il tenir compte du réchauffement qui a pu se produire pendant que la pince était ouverte?

— Les mesures que l'on vient de faire permettent-elles de rendre compte de l'échauffement considérable qui se produit dans l'expérience classique du *brûquet à air*?

TRANSMISSION DE LA CHALEUR.

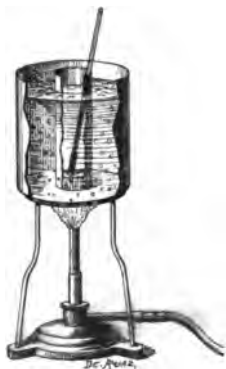
73. Conduction. — *Expériences qualitatives.* — Chauffer dans un bec Bunsen des tiges de matières diverses tenues à la main (bois, fer, cuivre, etc.). — Couper une flamme de gaz avec une toile métallique. — Allumer une flamme de gaz au-dessus d'une



toile métallique. — Fondre de l'étain dans un creuset fait d'un morceau de carton mince. — Remplir à moitié un vase de verre avec de l'eau froide, que l'on recouvre d'eau chaude en évitant le mélange des deux couches de liquide. Il suffit pour cela de verser l'eau chaude sur un bouchon plat, flottant sur l'eau froide, en se servant d'un tube à entonnoir coupé très court et garni d'un tampon d'ouate. Ayant mis un thermomètre dans l'eau froide on constatera

l'absence d'échauffement et, par conséquent, l'absence de conductibilité. — Mettre la main dans de l'eau très chaude : constater que l'on supporte mieux le contact quand on laisse la main immobile (29, 108).

74. Conduction et convection. — *Mesure de la résistance au passage.* — Couper un tube de laiton ($l = 12^{\text{cm}}$, $d = 4^{\text{cm}}$, $e = 0^{\text{mm}}$, 1), le fermer à un bout par un bouchon de liège, mettre de l'eau dans ce tube et prendre sa température. Mettre ce tube dans de l'eau bouillante en ayant soin que l'eau soit au même niveau à l'extérieur et à l'intérieur, le laisser chauffer pendant 10 secondes et noter l'élévation de température de l'eau intérieure.



On calculera la *résistance calorifique apparente* du tube et des couches d'eau **en contact, c'est-à-dire le rapport** de la différence de température à la **quantité de chaleur** passant par seconde, et l'on en

déduira la résistance calorifique par centimètre carré de surface du tube. Cette *résistance apparente* au passage est-elle beaucoup plus grande que la résistance calorifique vraie déduite du coefficient de conductibilité de la couche métallique traversée.

— Répéter une expérience analogue avec un tube de verre épais contenant aussi de l'eau (éprouvette à gaz). La *résistance calorifique apparente* réside-t-elle encore dans les couches de passage?

75. Mesure absolue d'un coefficient de conductibilité. —



Montage. — Percer un trou ($d = 2^{\text{cm}}$) à 2^{cm} du fond dans la paroi d'une boîte de fer-blanc ($V = 1^{\text{l}}$). Préparer de même une autre boîte plus petite ($V = \frac{1}{4}$ de litre). Couper une barre de fer ($l = 20^{\text{cm}}$, $d = 2^{\text{cm}}$) et souder les boîtes métalliques aux deux bouts, en y faisant

pénétrer la barre de fer d'environ 3^{cm} .

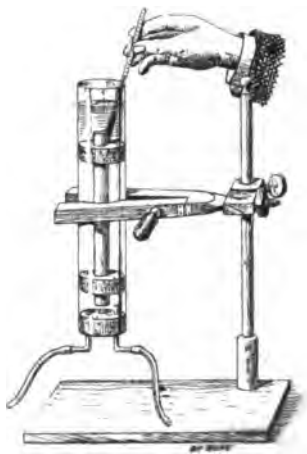
Faire des gouttières longitudinales demi-cylindriques ($d = 2^{\text{cm}}$)

dans deux *briques de liège aggloméré*, de manière à constituer pour la barre de fer un revêtement isolant ou bien recouvrir cette barre d'une épaisse chemise d'étoffe de laine.

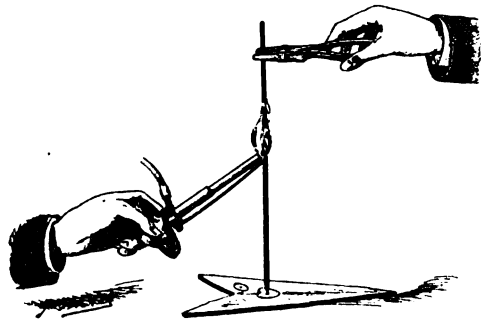
Expériences. — Remplir d'eau la grande boîte et la chauffer à l'ébullition, en faisant reposer la petite boîte pleine d'eau froide sur un support isolant (caisse en bois, $h = 20^{\text{cm}}$). Lorsque l'eau aura bouilli pendant plusieurs minutes, on siphonnera l'eau de la petite boîte et l'on y mettra une quantité connue (100^{g}) d'eau fraîche dont on mesurera la vitesse d'échauffement en appréciant les dixièmes de degré.

Évaluer la capacité calorifique du vase calorimétrique et du morceau de barre de fer qui y pénètre, et déduire de toutes ces données la valeur absolue du coefficient de conductibilité du fer. — Y a-t-il lieu de tenir compte des résistances calorifiques apparentes au passage de l'eau au fer et du fer à l'eau?

— On pourrait disposer toute l'expérience calorimétrique dans un verre de lampe à gaz en y **fixant** la tige métallique au moyen de bouchons de liège et en chauffant avec un courant de vapeur (87).



76. Conduction dans les corps anisotropes. — Cliver



une lame de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur dans un échantillon de gypse en fer de lance. Avec la pointe d'une lime

tiers-point affûtée à la meule, percer dans cette lame deux trous ($d = 0^{\text{cm}}, 2$) dont l'un soit sur la ligne de môle. Rectifier soigneusement le clivage d'une des faces de la lame au voisinage des trous, et enduire cette face d'une couche aussi mince que possible de stéarine ou de cire.

Préparer d'autre part une tige de cuivre rouge ($l = 20^{\text{cm}}$, $d = 0^{\text{cm}}, 5$) dont une extrémité sera tuillée en pointe ($l = 2^{\text{m}}$) et enfiler cette pointe dans l'un des trous de la lame de gypse. Tenant alors la tige dans une pince, on la chauffera avec un bec Bunsen en un point placé au-dessus du gypse et l'on suivra la fusion de la stéarine. Après refroidissement, on étudiera la courbe elliptique ou la courbe en cœur que forme le bourrelet de stéarine fondue.

Au moyen d'une lame de canif, agissant par coupure et clivage, enlever maintenant la moitié de l'épaisseur du gypse sur une grande partie de la surface de l'ellipse dessinée par la stéarine fondue; enduire à nouveau de stéarine et répéter l'expérience. La propagation de la chaleur se fait-elle moins bien dans la partie amincie? — Recommencer l'expérience en enduisant l'autre face avec de la stéarine. Comment la chaleur franchit-elle la ligne de séparation des deux régions d'épaisseurs inégales? Que peut-on conclure de ces expériences relativement à la propagation de la chaleur perpendiculairement aux plans de clivage?

— On fera une expérience analogue avec une lame de mica: y a-t-il une ellipticité sensible de la courbe de fusion?

77. Pouvoirs émissifs. — Polir au blanc d'Espagne un tiers de la surface d'une boîte en fer-blanc cylindrique ($V = 1^l$), noircir un autre tiers avec du noir de fumée délayé dans de l'essence de térébenthine et peindre en blanc mat le reste de la surface.



Pour faire une expérience, remplir cette boîte d'eau bouillante, noter la température ambiante et approcher un thermomètre à réservoir noirci à une distance de 3^{cm} de la surface de la boîte. La température s'élèvera et l'on notera la température station-

naire en appréciant au moins les dixièmes de degré.

On tournera la boîte chaude de manière à exposer successivement le thermomètre au rayonnement de la surface polie, puis de la surface blanche et de la surface noire et l'on notera les nouvelles températures stationnaires. On déduira de ces mesures les rapports des trois pouvoirs émissifs.

78. Refroidissement. — Importance des phénomènes de convection. — Couper un tube de laiton ($l = 20^{\text{cm}}$, $d = 2^{\text{cm}}$), le polir au papier d'émeri fin, le fermer par deux bouchons dont l'un permettra le passage d'un thermomètre, et le remplir d'eau.

Chauffer l'eau vers 80° , poser le tube verticalement en le faisant tenir sur la table avec un peu de cire molle et le laisser refroidir en agitant de temps en temps avec le thermomètre. On lira la température toutes les deux minutes et l'on construira la courbe de refroidissement. La vitesse de refroidissement est-elle proportionnelle à l'excès de la température du tube sur la température de l'air ambiant?

— Enduire de noir de fumée la surface du tube, réchauffer l'eau et laisser refroidir de nouveau. La vitesse de refroidissement est-elle augmentée dans le rapport des pouvoirs émissifs? Le rôle des phénomènes de convection est-il plus important que celui du rayonnement?

— Recommencer l'expérience en remplissant le tube avec de l'alcool. Le temps mis pour passer d'une température à une autre est-il plus court que dans l'expérience primitive? Est-il en raison inverse de la capacité calorifique?

— On peut aussi remplir avec de l'eau bouillante deux ballons de verre ($V = 250^{\text{cm}^3}$) dont l'un aura été enduit de noir de fumée; les suspendre l'un près de l'autre, et suivre les températures à l'aide d'un thermomètre que l'on transportera de l'un des ballons dans l'autre. Trouve-t-on une différence sensible entre les deux courbes de refroidissement?

On mesurera encore le refroidissement en plaçant l'un des ballons dans une boîte contenant de la sciure de bois ou du duvet.

79. Refroidissement d'un calorimètre. — Rôle de l'évaporation. — Remplir d'eau chaude une boîte en fer-blanc ($V = 1^{\text{l}}$) munie d'un couvercle qu'on aura percé de deux trous pour permettre le passage d'un thermomètre et d'un agitateur formé d'un bouchon plat ($D = 4^{\text{cm}}$) fixé au bout d'une baguette de verre ($d = 0^{\text{cm}}$, 6). Placer ce calorimètre, avec son couvercle.

dans une boîte en fer-blanc un peu plus grande, en le faisant reposer sur trois cales de liège et étudier le refroidissement pendant dix minutes en agitant constamment.

Réchauffer ensuite le calorimètre, retirer le couvercle, et mesurer, aux mêmes températures, les nouvelles vitesses de refroidissement. Le refroidissement est-il notablement accéléré par l'évaporation ?



APPENDICE.

TABLEAUX NUMÉRIQUES.

**Inverses, carrés, racines carrées, cubes, racines cubiques,
circonférences et surfaces de cercles.**

x .	$\frac{1}{x}$.	x^2 .	\sqrt{x} .	x^3 .	$\sqrt[3]{x}$.	πx .	$\frac{\pi x^2}{4}$.
1	1,0000	1	1,000	1	1,000	3,14	0,79
2	0,5000	4	1,414	8	1,259	6,28	3,14
3	0,3333	9	1,732	27	1,442	9,42	7,07
4	0,2500	16	2,000	64	1,587	12,57	12,57
5	0,2000	25	2,236	125	1,709	15,71	19,63
6	0,1667	36	2,449	216	1,817	18,85	28,27
7	0,1429	49	2,645	343	1,912	21,99	38,48
8	0,1250	64	2,828	512	2,000	25,13	50,27
9	0,1111	81	3,000	729	2,080	28,27	63,62
10	0,1000	100	3,162	1 000	2,154	31,42	78,54
11	0,0909	121	3,316	1 331	2,223	34,56	95,03
12	0,0833	144	3,464	1 728	2,289	37,70	113,10
13	0,0769	169	3,605	2 197	2,351	40,84	132,73
14	0,0714	196	3,741	2 744	2,410	43,98	153,94
15	0,0667	225	3,872	3 375	2,466	47,12	176,71
16	0,0625	256	4,000	4 096	2,519	50,27	201,06
17	0,0588	289	4,123	4 913	2,571	53,41	226,98
18	0,0556	324	4,242	5 832	2,620	56,55	254,47
19	0,0526	361	4,358	6 859	2,668	59,69	283,53
20	0,0500	400	4,472	8 000	2,714	62,83	314,16
21	0,0476	441	4,582	9 261	2,758	65,97	346,36
22	0,0455	484	4,690	10 648	2,802	69,11	380,13
23	0,0435	529	4,795	12 167	2,843	72,26	415,48
24	0,0417	576	4,898	13 824	2,884	75,40	452,39
25	0,0400	625	5,000	15 625	2,924	78,54	490,87
26	0,0385	676	5,099	17 576	2,962	81,68	530,93
27	0,0370	729	5,196	19 683	3,000	84,82	572,56
28	0,0357	784	5,291	21 952	3,036	87,96	615,75
29	0,0345	841	5,385	24 389	3,072	91,11	660,52
30	0,0333	900	5,477	27 000	3,107	94,25	706,86
31	0,0323	961	5,567	29 791	3,141	97,39	754,77
32	0,0313	1 024	5,656	32 768	3,174	100,53	804,25
33	0,0303	1 089	5,744	35 937	3,207	103,67	855,30
34	0,0294	1 156	5,830	39 304	3,239	106,81	907,92
35	0,0286	1 225	5,916	42 875	3,271	109,96	962,11
36	0,0278	1 296	6,000	46 656	3,301	113,10	1 017,88
37	0,0270	1 369	6,082	50 653	3,332	116,24	1 075,21
38	0,0263	1 444	6,164	54 872	3,361	119,38	1 134,11
39	0,0256	1 521	6,244	59 319	3,391	122,52	1 194,59
40	0,0250	1 600	6,324	64 000	3,419	125,66	1 256,64
41	0,0244	1 681	6,403	68 921	3,448	128,80	1 320,25
42	0,0238	1 764	6,480	74 088	3,476	131,95	1 385,44
43	0,0233	1 849	6,557	79 507	3,503	135,09	1 452,20
44	0,0227	1 936	6,633	85 184	3,530	138,23	1 520,53
45	0,0222	2 025	6,708	91 125	3,556	141,37	1 590,43
46	0,0217	2 116	6,782	97 336	3,583	144,51	1 661,90
47	0,0213	2 209	6,855	103 823	3,608	147,65	1 734,94
48	0,0208	2 304	6,928	110 592	3,634	150,80	1 809,56
49	0,0204	2 401	7,000	117 649	3,659	153,94	1 885,74
50	0,0200	2 500	7,071	125 000	3,684	157,08	1 963,49

Inverses, carrés, racines carrées, cubes, racines cubiques, circonférences et surfaces de cercles (suite).

x .	$\frac{1}{x}$.	x^2 .	\sqrt{x} .	x^3 .	$\sqrt[3]{x}$.	πx .	$\frac{\pi x^2}{4}$.
51	0,0196	2 601	7,141	131 651	3,708	160,22	2 042,82
52	0,0192	2 704	7,211	140 608	3,732	163,36	2 123,72
53	0,0189	2 809	7,280	148 877	3,756	166,50	2 206,18
54	0,0185	2 916	7,348	157 464	3,779	169,65	2 290,21
55	0,0182	3 025	7,416	166 375	3,802	172,79	2 375,88
56	0,0179	3 136	7,483	175 616	3,825	175,93	2 463,01
57	0,0175	3 249	7,549	185 193	3,848	179,07	2 551,76
58	0,0172	3 364	7,615	195 112	3,870	182,21	2 642,08
59	0,0169	3 481	7,681	205 379	3,892	185,35	2 733,97
60	0,0167	3 600	7,745	216 000	3,914	188,50	2 827,43
61	0,0164	3 721	7,810	226 981	3,936	191,64	2 922,47
62	0,0161	3 844	7,874	238 328	3,957	194,78	3 019,07
63	0,0159	3 969	7,937	250 047	3,979	197,92	3 117,24
64	0,0156	4 096	8,000	262 144	4,000	201,06	3 216,99
65	0,0154	4 225	8,062	274 625	4,020	204,20	3 318,31
66	0,0152	4 356	8,124	287 496	4,041	207,34	3 421,19
67	0,0149	4 489	8,185	300 763	4,061	210,49	3 525,65
68	0,0147	4 624	8,246	314 432	4,081	213,63	3 631,68
69	0,0145	4 761	8,306	328 509	4,101	216,77	3 739,28
70	0,0143	4 900	8,366	343 000	4,121	219,91	3 848,45
71	0,0141	5 041	8,426	357 911	4,140	223,05	3 959,19
72	0,0139	5 184	8,485	373 248	4,160	226,19	4 071,50
73	0,0137	5 329	8,544	389 017	4,179	229,34	4 185,39
74	0,0135	5 476	8,602	405 224	4,198	232,48	4 300,84
75	0,0133	5 625	8,660	421 875	4,217	235,62	4 417,86
76	0,0132	5 776	8,717	438 976	4,235	238,76	4 536,46
77	0,0130	5 929	8,774	456 533	4,254	241,90	4 656,62
78	0,0128	6 084	8,831	474 522	4,272	245,04	4 778,36
79	0,0127	6 241	8,888	493 039	4,290	248,19	4 901,67
80	0,0125	6 400	8,944	512 000	4,308	251,33	5 026,55
81	0,0123	6 561	9,000	531 441	4,326	254,47	5 153,00
82	0,0122	6 724	9,055	551 368	4,344	257,61	5 281,02
83	0,0120	6 889	9,110	571 787	4,362	260,75	5 410,56
84	0,0119	7 056	9,165	592 704	4,379	263,89	5 541,77
85	0,0118	7 225	9,219	614 125	4,396	267,03	5 674,50
86	0,0116	7 396	9,273	636 056	4,414	270,18	5 808,80
87	0,0115	7 569	9,327	658 503	4,431	273,32	5 944,68
88	0,0114	7 744	9,380	681 472	4,447	276,46	6 082,12
89	0,0112	7 921	9,433	704 969	4,464	279,60	6 221,14
90	0,0111	8 100	9,486	729 000	4,481	282,74	6 361,72
91	0,0110	8 281	9,539	753 571	4,497	285,88	6 503,88
92	0,0109	8 464	9,591	778 688	4,514	289,03	6 647,61
93	0,0108	8 649	9,643	804 357	4,530	292,17	6 792,91
94	0,0106	8 836	9,695	830 584	4,546	295,31	6 939,78
95	0,0105	9 025	9,746	857 375	4,562	298,45	7 088,22
96	0,0104	9 216	9,797	884 736	4,578	301,59	7 238,23
97	0,0103	9 409	9,848	912 673	4,594	304,73	7 389,81
98	0,0102	9 604	9,899	941 192	4,610	307,88	7 542,96
99	0,0101	9 801	9,949	970 299	4,626	311,02	7 697,69
100	0,0100	10 000	10,000	1 000 000	4,642	314,16	7 853,98

Logarithmes décimaux et népériens

$$e = 2,71828, \quad \frac{1}{e} = 0,36788.$$

NOMBRES.	LOGARITHMES		NOMBRES.	LOGARITHMES	
	décimaux.	népériens.		décimaux.	népériens.
1	0,0000	0,0000	51	1,7076	3,9318
2	0,3010	0,6931	52	1,7160	3,9512
3	0,4771	1,0986	53	1,7243	3,9703
4	0,6021	1,3863	54	1,7324	3,9890
5	0,6990	1,6094	55	1,7404	4,0073
6	0,7782	1,7918	56	1,7482	4,0254
7	0,8451	1,9459	57	1,7559	4,0431
8	0,9031	2,0794	58	1,7634	4,0604
9	0,9542	2,1972	59	1,7709	4,0775
10	1,0000	2,3026	60	1,7782	4,0943
11	1,0414	2,3979	61	1,7853	4,1109
12	1,0792	2,4849	62	1,7924	4,1271
13	1,1139	2,5649	63	1,7993	4,1431
14	1,1461	2,6391	64	1,8062	4,1589
15	1,1761	2,7081	65	1,8129	4,1744
16	1,2041	2,7726	66	1,8195	4,1897
17	1,2304	2,8332	67	1,8261	4,2047
18	1,2553	2,8904	68	1,8325	4,2195
19	1,2788	2,9444	69	1,8388	4,2341
20	1,3010	2,9957	70	1,8451	4,2485
21	1,3222	3,0445	71	1,8513	4,2627
22	1,3424	3,0910	72	1,8573	4,2767
23	1,3617	3,1355	73	1,8633	4,2905
24	1,3802	3,1781	74	1,8692	4,3041
25	1,3979	3,2189	75	1,8751	4,3175
26	1,4150	3,2581	76	1,8808	4,3307
27	1,4314	3,2958	77	1,8865	4,3438
28	1,4472	3,3322	78	1,8921	4,3567
29	1,4624	3,3673	79	1,8976	4,3694
30	1,4771	3,4012	80	1,9031	4,3820
31	1,4914	3,4340	81	1,9085	4,3944
32	1,5051	3,4657	82	1,9138	4,4067
33	1,5185	3,4965	83	1,9191	4,4188
34	1,5315	3,5264	84	1,9243	4,4308
35	1,5441	3,5553	85	1,9294	4,4427
36	1,5563	3,5835	86	1,9345	4,4543
37	1,5682	3,6109	87	1,9395	4,4659
38	1,5798	3,6376	88	1,9445	4,4773
39	1,5911	3,6636	89	1,9494	4,4886
40	1,6021	3,6889	90	1,9542	4,4998
41	1,6128	3,7136	91	1,9590	4,5109
42	1,6232	3,7377	92	1,9638	4,5218
43	1,6335	3,7612	93	1,9685	4,5326
44	1,6435	3,7842	94	1,9731	4,5433
45	1,6532	3,8067	95	1,9777	4,5539
46	1,6628	3,8286	96	1,9823	4,5643
47	1,6721	3,8501	97	1,9868	4,5747
48	1,6812	3,8712	98	1,9912	4,5850
49	1,6902	3,8918	99	1,9956	4,5951
50	1,6990	3,9120	100	2,0000	4,6052

Valeurs naturelles des fonctions circulaires
de degré en degré.

	SINUS.	COSINUS.	TANG.	COTANG.	
0	0,0000	1,0000	0,0000	∞	90
1	0,0175	0,9998	0,0175	57,290	89
2	0,0349	0,9994	0,0349	28,636	88
3	0,0523	0,9986	0,0524	19,081	87
4	0,0698	0,9976	0,0699	14,301	86
5	0,0872	0,9962	0,0875	11,430	85
6	0,1045	0,9945	0,1051	9,5144	84
7	0,1219	0,9925	0,1228	8,1443	83
8	0,1392	0,9903	0,1405	7,1154	82
9	0,1564	0,9877	0,1584	6,3138	81
10	0,1736	0,9848	0,1763	5,6713	80
11	0,1908	0,9816	0,1944	5,1446	79
12	0,2079	0,9781	0,2126	4,7046	78
13	0,2250	0,9744	0,2309	4,3315	77
14	0,2419	0,9703	0,2493	4,0108	76
15	0,2588	0,9659	0,2679	3,7321	75
16	0,2756	0,9613	0,2867	3,4874	74
17	0,2924	0,9563	0,3057	3,2709	73
18	0,3090	0,9511	0,3249	3,0777	72
19	0,3256	0,9455	0,3443	2,9042	71
20	0,3420	0,9397	0,3640	2,7475	70
21	0,3584	0,9336	0,3839	2,6051	69
22	0,3746	0,9272	0,4040	2,4751	68
23	0,3907	0,9205	0,4245	2,3559	67
24	0,4067	0,9135	0,4452	2,2460	66
25	0,4226	0,9063	0,4663	2,1445	65
26	0,4384	0,8988	0,4877	2,0503	64
27	0,4540	0,8910	0,5095	1,9626	63
28	0,4695	0,8829	0,5317	1,8807	62
29	0,4848	0,8746	0,5543	1,8040	61
30	0,5000	0,8660	0,5774	1,7321	60
31	0,5150	0,8572	0,6009	1,6643	59
32	0,5299	0,8480	0,6249	1,6003	58
33	0,5446	0,8387	0,6494	1,5399	57
34	0,5592	0,8290	0,6745	1,4826	56
35	0,5736	0,8192	0,7002	1,4281	55
36	0,5878	0,8090	0,7265	1,3764	54
37	0,6018	0,7986	0,7536	1,3270	53
38	0,6157	0,7880	0,7813	1,2799	52
39	0,6293	0,7771	0,8098	1,2349	51
40	0,6428	0,7660	0,8391	1,1918	50
41	0,6561	0,7547	0,8693	1,1504	49
42	0,6691	0,7431	0,9004	1,1106	48
43	0,6820	0,7314	0,9325	1,0724	47
44	0,6947	0,7193	0,9657	1,0355	46
45	0,7071	0,7071	1,0000	1,0000	45
	COSINUS.	SINUS.	COTANG.	TANG.	

Valeurs naturelles des fonctions circulaires de grade en grade.

	COSINUS.	SINUS.	TANG.	COTANG.	
0	0,0000	1,0000	0,0000	∞	100
1	0,0157	0,9999	0,0157	63,6567	99
2	0,0314	0,9995	0,0314	31,8205	98
3	0,0471	0,9989	0,0472	21,2049	97
4	0,0628	0,9980	0,0629	15,8945	96
5	0,0785	0,9969	0,0787	12,7062	95
6	0,0941	0,9956	0,0945	10,5789	94
7	0,1097	0,9940	0,1104	9,0079	93
8	0,1253	0,9921	0,1263	7,9158	92
9	0,1409	0,9900	0,1423	7,0264	91
10	0,1564	0,9877	0,1584	6,3138	90
11	0,1719	0,9851	0,1745	5,7297	89
12	0,1874	0,9823	0,1908	5,2422	88
13	0,2028	0,9792	0,2071	4,8288	87
14	0,2181	0,9759	0,2235	4,4737	86
15	0,2334	0,9724	0,2401	4,1653	85
16	0,2487	0,9686	0,2568	3,8947	84
17	0,2639	0,9646	0,2736	3,6554	83
18	0,2790	0,9603	0,2905	3,4420	82
19	0,2940	0,9558	0,3076	3,2506	81
20	0,3090	0,9511	0,3249	3,0777	80
21	0,3239	0,9461	0,3424	2,9208	79
22	0,3387	0,9409	0,3600	2,7776	78
23	0,3535	0,9354	0,3779	2,6464	77
24	0,3681	0,9298	0,3959	2,5257	76
25	0,3827	0,9239	0,4142	2,4142	75
26	0,3971	0,9178	0,4327	2,3109	74
27	0,4115	0,9114	0,4514	2,2148	73
28	0,4258	0,9048	0,4706	2,1251	72
29	0,4399	0,8980	0,4899	2,0413	71
30	0,4540	0,8910	0,5095	1,9626	70
31	0,4679	0,8838	0,5295	1,8887	69
32	0,4818	0,8763	0,5498	1,8190	68
33	0,4955	0,8686	0,5704	1,7532	67
34	0,5090	0,8607	0,5914	1,6909	66
35	0,5225	0,8526	0,6128	1,6319	65
36	0,5358	0,8443	0,6346	1,5757	64
37	0,5490	0,8358	0,6569	1,5224	63
38	0,5621	0,8271	0,6796	1,4715	62
39	0,5750	0,8181	0,7028	1,4220	61
40	0,5878	0,8090	0,7265	1,3746	60
41	0,6004	0,7997	0,7508	1,3319	59
42	0,6129	0,7902	0,7757	1,2892	58
43	0,6252	0,7804	0,8012	1,2481	57
44	0,6374	0,7705	0,8273	1,2088	56
45	0,6494	0,7604	0,8541	1,1708	55
46	0,6613	0,7501	0,8816	1,1343	54
47	0,6730	0,7396	0,9099	1,0990	53
48	0,6845	0,7290	0,9391	1,0649	52
49	0,6959	0,7181	0,9691	1,0319	51
50	0,7071	0,7071	1,0000	1,0000	50
	COSINUS.	SINUS.	TANG.	COTANG.	

Conversion des degrés et des grades en radians.

1 degré	= 0,017 45 ^{radian}
1 minute	= 0,000 291
1 seconde	= 0,000 005 3
1 grade	= 0,015 708
1 radian	= 57 ⁿ 18'
1 radian	= 63 ^{grades} ,66

Valeurs de $1 - \cos x$.

x EN DEGRÉS.	$1 - \cos x$.	x EN RADIAN.
1°	0,0002	0,017
5	0,0038	0,087
10	0,015	0,17
15	0,034	0,26
20	0,060	0,35
25	0,094	0,44

Coefficients d'élasticité.

Allongement pour un effort de une mégadyne par centimètre carré.

MATÉRIAUX.	ALLONGEMENT.
Tige de sapin...	0,000 01
Tige de verre...	0,000 002
Tige de laiton...	0,000 001
Tige de fer.....	0,000 000 5

Coefficients de compressibilité.

Compression pour une mégadyne par centimètre carré.

CORPS.	COMPRESSION.
Eau.....	0,000 042
Mercure.....	0,000 003 9
Verre.....	0,000 002
Acier.....	0,000 000 05

Résistance des matériaux à la traction

(en mégadynes par centimètre carré).

MATÉRIAUX.	CHARGE PRATIQUE.	LIMITE D'ÉLASTICITÉ.	CHARGE DE RUPTURE.
Acier fondu.....	2500	3000	13000
Fer.....	1000	3000	6500
Cuivre écroui....	600	1200	4000
Fil de coton.....	"	"	2700
Chêne.....	"	"	600 à 800
Sapin.....	"	"	800 à 900

Coefficients de frottement.

MATÉRIAUX.	AU DÉPART	PENDANT le mouvement.
Fer sur fer {	surfaces sèches.....	"
	surfaces onctueuses.....	0,13
Fer sur chêne en fibres parallèles {	surfaces humides.....	0,65
	surfaces suiffées.....	0,11
Chêne sur chêne en fibres parallèles.....	0,6	0,48
Chanvre sur chêne en fibres parallèles....	0,80	0,52

Valeur de g à Paris..... 980,96

Variations du poids d'un corps à la surface de la terre.

POIDS D'UN CORPS A LA LATITUDE λ .		POIDS D'UN CORPS A L'ALTITUDE h .	
λ .	P.	h .	P.
0°	1000 - 2,6	0 ^m	1000
45	1000	1000	1000 - 0,2
90	1000 + 2,6	2000	1000 - 0,4

Variations de hauteur du baromètre avec l'altitude
(air à 10° C.).

ALTITUDE en mètres.	HAUTEUR BAROMÉTRIQUE en millimètres.
0	760
400	724
800	690
1200	658
1600	627
2000	598

Correction de capillarité pour le baromètre.

DIAMÈTRE du tube.	HAUTEUR DU MÉNISQUE.			
	0 ^{cm} , 06.	0 ^{cm} , 1.	0 ^{cm} , 14.	0 ^{cm} , 18.
cm	cm	cm	cm	cm
0,4	0,122	0,108	"	"
0,8	0,020	0,038	0,056	0,077
1,2	"	0,010	0,015	0,019

Tension superficielle
(en dynes par centimetre).

EAU			ÉTHER à 20°.	ALCOOL à 20°.	TÉRÉ- BENTHINE à 20°.	MERCURE à 20°.
à 0°.	à 50°.	à 100°.				
78	69	59	17	24	27	67

Densités.

Densité de l'air (0° 760^{mm}) = 0,001293.

Solides.

Aluminium.....	2,6	Bois de chêne.....	0,6 à 1,2
Argent.....	10,5	Bois d'ébène.....	1,1 à 1,3
Cuivre.....	8,9	Bois de sapin.....	0,5 à 0,7
Étain.....	7,3	Brique.....	1,5
Fer forgé.....	7,8	Caoutchouc.....	0,9
Or.....	19,3	Cire.....	0,9
Platine.....	21,5	Ébonite.....	1,1
Plomb.....	11,3	Marbre.....	2,7
Soufre octaédrique....	2,07	Pierre de liais.....	2,3
Soufre prismatique....	1,96	Verre (crown).....	2,5 à 2,7
Zinc.....	7,1	Verre (flint).....	3 à 4

Liquides.

Acétone.....	(0/4) 0,819	Glycérine.....	(15/4) 1,260
Alcool.....	(15/4) 0,794	Huile d'olive.....	0,91
Aniline.....	(20/4) 1,022	Mercure.....	(20/4) 13,546
Benzine.....	(20/4) 0,880	Pétrole lampant..	0,76 à 0,83
Chloroforme.....	(0/4) 1,526	Sulfure de carbone.	(20/4) 1,263
Essence minérale..	0,66	Essence de téréb..	0,87
Éther.....	(0/0) 0,736	Toluène.....	(20/4) 0,886

Degrés Baumé et densités correspondantes

$$d = \frac{144,3}{144,3 - n}$$

DEGRÉS BAUMÉ.	DENSITÉS.	DEGRÉS BAUMÉ.	DENSITÉS.
5	1,036	40	1,384
10	1,074	45	1,453
15	1,116	50	1,530
20	1,161	55	1,616
25	1,210	60	1,712
30	1,262	65	1,820
35	1,320	66	1,842

Densités de diverses solutions aqueuses.

Les concentrations donnent la masse du corps dissous existant dans 100^g de la solution.

AzH ³		KOH		NaOH		AzO ³ H		HCl		SO ⁴ H ²	
%.	d (15/15).	%.	d (15/15).	%.	d (15/15).	%.	d (15/4).	%.	d (15/4).	%.	d (15/4).
9	0,9631	10	1,083	10	1,115	25	1,151	10	1,049	25	1,182
18	0,9314	30	1,288	30	1,332	50	1,316	20	1,100	50	1,399
27	0,9052	50	1,539	50	1,540	75	1,441	30	1,152	75	1,675
36	0,8844	70	1,790	70	1,748	100	1,523	39	1,200	100	1,839

NaCl		CO ³ Na ² + 10 H ² O		S ² O ³ Na ² + 5 H ² O		SO ⁴ Cu + 5 H ² O		ALCOOL.		SUCRE.	
%.	d (15/15).	%.	d (15/15).	%.	d (19/19).	%.	d (18/18).	%.	d (15/15).	%.	d (15/15).
7	1,051	10	1,039	5	1,026	8	1,052	25	0,965	15	1,061
14	1,104	20	1,079	20	1,109	16	1,106	50	0,919	35	1,154
21	1,159	30	1,118	35	1,199	24	1,166	75	0,861	55	1,261
26	1,201	38	1,152	50	1,295	30	1,215	100	0,794	75	1,384

Densités de l'eau à différentes températures.

TEMPÉRATURES.	DENSITÉS.	VOLUMES.	
		cm ³	cm ³
0			
— 10	0,998 15	1000 +	0,19
0	0,999 87	1000 +	0,13
4	1,000 00	1000	
10	0,999 74	1000 +	0,26
20	0,998 25	1000 +	1,75
50	0,988 13	1000 +	12,01
100	0,958 63	1000 +	43,15

Maximum de densité de l'eau salée.

	Na Cl POUR 100.					
	0,5.	1.	2.	4.	6.	8.
Température du maximum de densité.....	+ 3°	+ 1°,77	— 0°,58	— 5°,63	— 11°,07	— 16°,62

Coefficients de dilatation linéaire.

Laiton (71 ⁵ Cu + 29 ⁵ Zn).....	0,000 019
Fer.....	0,000 012
Platine.....	0,000 009
Métal <i>Invar</i> (acier au nickel).....	0,000 001
Verre.....	0,000 008
Bois de chêne (en travers des fibres).....	0,000 058
Bois de chêne (le long des fibres).....	0,000 004
Quartz fondu.....	0,000 000 7

Coefficients de dilatation cubique.

Acétone (0/50).....	0,00162	Huile d'olive	0,00074
Alcool (0/80).....	0,00105	Mercure (0/100).....	0,000181
Aniline (0/100).....	0,00092	Pétrole (0/100).....	0,00104
Benzine (0/80).....	0,00138	Sulfure de carbone (0/40)...	0,00147
Chloroforme (0/63).....	0,00140	Essence de térébenthine....	0,00100
Glycérine.....	0,00053	Toluène (0/100).....	0,00121

Coefficients de dilatation cubique de quelques gaz.

GAZ.	A VOLUME CONSTANT.		A PRESSION CONSTANTE.	
	Pression.	Coefficient 0/100.	Pression.	Coefficient 0/100.
Air.....	760 ^{mm}	0,003669	760 ^{mm}	0,003671
Azote.....	1000	0,003675	1000	0,003673
Id.	très faible	0,0036613	très faible	0,0036612
Oxyde de carbone..	760	0,003667	760	0,003669
Gaz carboniqué....	1000	0,003725	760	0,003710
Id.	8000	0,004252	2520	0,003846
Hydrogène.....	1000	0,003662	1000	0,003660
Id.	très faible	0,0036624	très faible	0,0036625

Corrections des échelles thermométriques.

T (hydrogène) = T (azote, ou mercure) + correction.

TEMPÉRATURES du thermomètre à hydrogène.	CORRECTIONS DES THERMOMÈTRES	
	à azote à pression variable.	à mercure en verre dur.
— 35	+ 0,03	+ 0,36
0	0,00	0,00
+ 40	— 0,01 (max.)	— 0,11 (max.)
+ 100	0,00	0,00
+ 130	+ 0,01	+ 0,07 (max.)
+ 170	+ 0,015	0,00
+ 250	+ 0,03	— 0,12
+ 500	+ 0,07	"

Repères thermométriques.
Températures de fusion et d'ébullition.

Ébullition de l'hydrogène.....	-- 252°
Ébullition de l'oxygène.....	-- 182,5
Fusion du mercure.....	-- 38,8
Ébullition de l'alcool.....	78,3 + $\frac{H - 760}{29,7}$
Ébullition de l'eau.....	100 + $\frac{H - 760}{27,25}$
Ébullition de l'aniline.....	184,1 + $\frac{H - 760}{19,6}$
Ébullition de la naphthaline.....	218 + $\frac{H - 760}{17,1}$
Ébullition du mercure.....	357 + $\frac{H - 760}{13,3}$
Fusion de l'étain.....	232
Fusion du plomb.....	327
Fusion du zinc.....	419
Ébullition du soufre.....	445 + 0,8(H - 760)
Ébullition du zinc.....	920
Fusion de l'argent.....	960
Fusion de l'or.....	1060
Fusion du palladium.....	1500
Fusion du platine.....	1775

Évaluation des températures élevées.

Rouge naissant.....	500°	Orangé.....	1100°
Rouge sombre.....	700	Orangé clair.....	1200
Cerise.....	900	Blanc.....	1300
Cerise clair.....	1000	Blanc éblouissant.....	>1500

Variations de la chaleur spécifique de l'eau.

TEMPÉRATURES.	CHALEUR SPÉCIFIQUE	
	en ergs.	en calories de 20°.
0		
10	4 195	1,0034
15	4 187	1,0015
20	4 181	1,0000
25	4 176	0,9988
30	4 175	0,9985
35	4 177	0,9990
100	"	1,01
200	"	1,04

Chaleurs spécifiques vers 20°.

Aluminium.....	0,22	Eau.....	1
Fer.....	0,11	Mercure.....	0,0331
Cuivre.....	0,09	Acétone.....	0,43
Étain.....	0,055	Alcool.....	0,60
Laiton.....	0,09	Benzine.....	0,43
Plomb.....	0,031	Pétrole.....	0,50
Verre blanc.....	0,16 à 0,19	Essence de térébenthine.....	0,42

Chaleurs spécifiques de quelques gaz.

	A PRESSION CONSTANTE.	$\frac{C}{c}$
Air de - 30° à + 10°.....	0,238	
Air de + 0° à + 200°.....	0,238	
Oxygène.....	0,218	
Azote.....	0,244	1,38 à 1,39
Oxyde de carbone.....	0,243	
Hydrogène.....	3,41	
Gaz carbonique.....	0,202	1,29
Gaz complexes.....	"	1,1 à 1,2
Vapeur de mercure.....	"	1,66

Pouvoirs calorifiques de quelques combustibles

(en grandes calories.)

	MASSE.	CHALEUR dégagée.		MASSE.	CHALEUR dégagée.
	kg			kg	
Alcool.....	1	7 000	Gaz d'éclairage..	1	11 000
Acétylène.....	1	12 000	Houille.....	1	8 000 à 9 500
Bois sec.....	1	4 500 à 5 000	Hydrogène.....	1	3 400
Coke.....	1	7 000	Pétrole.....	1	11 000

Chaleurs de fusion et abaissements moléculaires des points de congélation.

DISSOLVANTS.	TEMPÉRATURE de congélation T.	CHALEUR de fusion L.	ABAISSEMENT MOLÉCULAIRE Masse moléc. × abais. solut. à 1 p. 100.	
			Calculé par Van't Hoff. $0,01 \frac{T^2}{L}$.	Observé par Raoult.
Eau.....	273	79	18,7	18,5
Acide acétique.	273 + 16,75	43,2	38,3	38,6
Acide formique.	273 - 8,52	55,6	28,1	27,7
Benzine.....	273 + 4,96	29,1	52,5	50,0
Nitrobenzine...	273 + 5,28	22,3	68,6	70,7

**Chaleurs de vaporisation
et élévations moléculaires des températures d'ébullition.**

DISSOLVANTS.	TEMPÉRATURE d'ébullition T.	CHALEUR de vaporisation L.	ÉLÉVATION MOLÉCULAIRE Masse moléc. \times abais. solut. à 1 p. 100.	
			Calculé $0,02 \frac{T^2}{L}$.	Observé.
Benzine.....	273 + 80,3	93	36,7	24,9
Alcool.....	273 + 78,3	215	11,5	11,5
Éther.....	273 + 35,0	90,1	21,1	21,5
Acétone.....	273 + 56,3	130	16,7	16,8
Eau.....	273 + 100	536	5,2	5,2
Acide acétique.	273 + 118	97	31,3	31,8
Acide formique.	273 + 101	120,4	23,1	23,0

Conductibilité thermique.

Petites calories passant en 1 seconde à travers 1^{cm}² d'une plaque épaisse de 1^{cm},
pour une chute de température de 1°.

Argent.....	1,1	Marbre.....	0,0011
Cuivre.....	1,05	Ébonite.....	0,0004
Laiton.....	0,2	Bois coupé perpendiculaire- ment aux fibres.....	0,00007
Fer.....	0,16	Bois coupé parallèlement aux fibres.....	0,00004
Mercure.....	0,02	Air atmosphérique.....	0,00005
Plomb.....	0,08		
Verre.....	0,0016		
Eau.....	0,0015		

Pressions de la vapeur d'eau.

— 15°	mm 1,44	°	120,6	atm 2
0	4,57		152,2	5
10	9,14		199	15
20	17,36		225	25
30	31,51		365	200
100	760			(point critique)

Pressions de la vapeur de mercure.

°	mm	°	mm
40	0,0008	357	760
100	0,27	400	1495
200	17	520	6736

Constantes critiques.

GAZ.	TEMPÉRATURE.	PRESSION.
Hydrogène.....	- 241 ^o	15 ^{atm}
Azote	- 146	35
Oxygène.....	- 119	51
Éthylène.....	+ 10	58
Gaz carbonique.....	+ 31,4	73
Éther.....	194	36
Alcool.....	243	63
Benzine.....	289	48
Acide acétique.....	322	57
Eau.....	365	200

FIN DE LA PREMIÈRE PARTIE.

TABLE DES MATIÈRES.



	Pages.
AVANT-PROPOS.....	V
AVERTISSEMENT.....	VII
LISTE DES COLLABORATEURS.....	IX
INDEX BIBLIOGRAPHIQUE.....	XI

CHAPITRE I.

TRAVAUX D'ATELIER.

Paragraphes.

1-12. Travail des métaux à l'étau.....	1
13-20. Travail des métaux au tour.....	9
21-31. Travail du bois à l'établi.....	16
32-36. Travail du bois au tour.....	25
37-49. Travail du verre.....	27

Supplément au Chapitre I.

50-115. Recettes diverses.....	36
--------------------------------	----

CHAPITRE II.

GÉOMÉTRIE. MÉCANIQUE.

1-3. Erreurs accidentelles et systématiques.....	53
4-6. Lois des grands nombres.....	54
7-10. Mesurer la longueur d'une ligne droite.....	56
11-12. Mesurer la longueur d'une ligne courbe.....	58
13-15. Mesures d'épaisseurs.....	60
16-16. Mesures de surfaces.....	64
17-18. Mesures de volume.....	65
19-26. Composition des forces.....	66
27-30. Étude de la balance.....	71
31-33. Inscription d'un travail mécanique.....	74
34-37. Flexion.....	76
38-42. Traction.....	80
43-46. Torsion.....	84

Paragraphes.	Pages.
47-55. Frottement des corps solides.....	87
56-57. Frottement des fluides.....	93
58-64. Mouvements variés.....	96
65-68. Étude chronographique d'un mouvement.....	100
69-71. Masse et accélération.....	104
72-75. Pendule.....	108
76-79. Percussions.....	114

CHAPITRE III.

HYDROSTATIQUE. — HYDRODYNAMIQUE. — CAPILLARITÉ.

1-4. Densité d'un corps solide.....	117
5-7. Densité d'un liquide.....	118
8-9. Pesanteur de l'air et des gaz.....	120
10-15. Pression atmosphérique.....	122
16-20. Manomètres.....	126
21-27. Pressions dans un liquide.....	132
28-29. Principe d'Archimède.....	136
30-39. Mouvements des fluides.....	138
40-40. Diffusion de l'hydrogène.....	144
41-46. Vitesses et pressions dans une veine liquide.....	145
47-50. Étude d'un courant d'air.....	148
51-53. Mouvements tourbillonnaires des fluides.....	151
54-60. Tension superficielle.....	152
61-64. Ascensions et dépressions.....	155
65-74. Formation des gouttes.....	158
75-79. Lames minces.....	166
80-83. Pression dans les bulles de savon.....	168

CHAPITRE IV.

CHALEUR.

1-5. Thermométrie.....	172
6-10. Dilatation des solides.....	176
11-13. Dilatation d'un liquide.....	180
14-16. Dilatation d'un gaz.....	184
17-18. Courants de convection.....	186
19-20. Fusion.....	187
21-23. Cryoscopie.....	189
24-27. Surfusion.....	191
28-32. Dissolution.....	194
33-37. Cristallisation.....	196
38-41. Compressibilité et liquéfaction d'un gaz.....	198
42-45. Pressions maxima des vapeurs.....	200

Paragraphes.	Pages.
46-47. Hygrométrie	204
48-57. Ébullition	205
58-60. Équivalent mécanique de la calorie.....	211
61-64. Chaleurs spécifiques.....	213
65-71. Chaleurs de fusion, de dissolution, de réaction et de vaporisation.	215
72-72. Compression et détente adiabatique d'un gaz.....	220
73-80. Transmission de la chaleur.....	221
TABLEAUX NUMÉRIQUES.....	226

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES DE LA PREMIÈRE PARTIE.

Paris. — Imprimerie GAUTHIER-VILLARS,
Quai des Grands-Augustins, 55.

33907

RECUEIL
D'EXPÉRIENCES
ÉLÉMENTAIRES
DE PHYSIQUE.

Paris. — Imprimerie GAUTHIER-VILLARS,
Quai des Grands-Augustins, 55.

34198

RECUEIL D'EXPÉRIENCES

ÉLÉMENTAIRES DE PHYSIQUE

PUBLIÉ

AVEC LA COLLABORATION DE NOMBREUX PHYSIENS,

PAR

Henri ABRAHAM,

Maitre de Conférences à l'École Normale supérieure,
Secrétaire général de la Société française de Physique.

SECONDE PARTIE.

ACOUSTIQUE. — OPTIQUE. — ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME.



PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55.

1904

(Tous droits réservés.)

*Les droits d'auteur de cet Ouvrage sont versés
à la Société française de Physique.*

AVANT-PROPOS.

Le Conseil de la Société française de Physique m'a autorisé, l'année dernière, à faire appel aux membres de la Société pour réunir les éléments d'un *Recueil d'Expériences élémentaires de Physique*.

Un grand nombre de physiciens ont apporté leur concours à cette tentative de multiple collaboration, en envoyant aussitôt des descriptions d'expériences et des indications bibliographiques. Plusieurs professeurs ont bien voulu me communiquer les cahiers contenant le résumé des expériences faites pendant leurs cours. Qu'il me soit permis de leur exprimer à tous ma vive reconnaissance (1).

Mais le défaut de place et aussi la nécessité de donner une certaine homogénéité à cet Ouvrage m'ont empêché d'utiliser tout ce que j'avais reçu. Je pourrais citer tels de nos collaborateurs dont je me trouve avoir beaucoup réduit, ou même complètement supprimé la collaboration. Je tiens beaucoup à m'en excuser auprès d'eux.

Je dois un remerciement particulier à M. Jules Lemoine, professeur au lycée Louis-le-Grand, qui a écrit le premier Chapitre

(1) A la suite de chaque description d'expérience, des renvois à la liste des Collaborateurs et à l'index bibliographique rappellent autant que possible les sources où l'on a puisé. — Ces renvois sont imprimés en caractères ordinaires, les renvois aux autres parties de l'Ouvrage sont imprimés en caractères gras.

de ce *Recueil*. Ces *Travaux d'atelier* ont été rédigés en s'inspirant des cours de travail manuel qui ont été réorganisés à l'École Normale supérieure, avec le concours de M. A. Dufour, agrégé-préparateur à l'École. Le *travail du verre*, notamment, est le résumé des notes prises pendant les excellentes leçons de M. Berlemont.

C'est encore pour moi un agréable devoir de dire de quels soins M. Gauthier-Villars a entouré la préparation matérielle de ce livre — et avec quelle conscience MM. de Ruaz et Morel en ont fait l'illustration : les figures ont été dessinées au laboratoire, d'après nature.

C'est maintenant à nos lecteurs que nous demandons leur collaboration : nous serons heureux de recevoir leurs observations et leurs critiques.



AVERTISSEMENT.

Ce Recueil a été partagé en deux Volumes qui correspondent dans leur ensemble aux programmes des classes de *Seconde* et de *Première*. Mais les cadres de ces programmes ont été largement débordés en vue d'autres enseignements, et, notamment, en vue de la classe de Mathématiques élémentaires.

Les expériences décrites dans cet Ouvrage sont des *manipulations*. On reconnaîtra facilement, pour beaucoup d'entre elles, qu'un changement d'échelle ou l'emploi des projections peuvent les transformer en expériences de cours — et nous l'avons rappelé à plusieurs reprises.

Mais ces descriptions ne sont accompagnées d'aucune théorie. La seule incursion que nous nous soyons permise sur ce terrain a été d'attirer à tout instant l'attention du lecteur sur le degré de précision des mesures, sur l'ordre de grandeur des choses, sur la nécessité ou l'inutilité d'une correction — et sur la représentation graphique des phénomènes.

Par contre, tout en étant forcé d'être bref, et, peut-être, l'avons-nous été trop, nous nous sommes attaché à décrire les moindres détails de montage et à indiquer les valeurs numériques adoptées pour toutes les quantités intervenant dans chaque expérience.

Nous n'avons pas cru devoir adopter un système de montages uniformes où l'on aurait toujours employé les mêmes accessoires. Nous avons cherché au contraire à les varier le plus possible. — Et ces montages ne nécessitent, le plus souvent, que des objets usuels, afin que les expériences puissent être répétées à la maison, ou, du moins, dans un laboratoire médiocrement outillé.

Nous avons rassemblé certaines recettes particulières et quelques tours de main d'atelier, par ordre alphabétique, en un supplément qui fait suite au Chapitre I^{er}.

Un Appendice, placé à la fin de chaque Volume, contient un certain nombre de constantes physiques et des Tableaux de valeurs numériques pour quelques fonctions usuelles.

Une Table analytique des matières se trouve à la fin du second Volume.



LISTE DES COLLABORATEURS.

1. D'ALADERN (Chartres).
- 1 *bis.* ADAM (Nancy).
2. ANDRAULT (Gap).
3. APPEYARD (Londres).
- 3 *bis.* AUBERT (Paris).
4. BADIOU (Bourges).
5. BASSET (Bourges).
6. DE LA BAUME PLUVINEL (Paris).
7. BEHN (Francfort-sur-Mein).
8. BENOIST (Paris).
9. BENOÎT (Sèvres).
10. BERLEMONT (Paris).
11. D. BERTHELOT (Paris).
12. BERTOUX (Lille).
13. BICHAT (Nancy).
14. BIRKELAND (Christiania).
15. V. BJERKNES (Stockholm).
- 15 *bis.* BLOCH (Paris).
16. BLONDEL (Paris).
17. BONGIOVANNI (Ferrare).
18. BOUSSE (Toulouse).
19. BOUCHER (Saint-Servan).
20. BRILLOUIN (Paris).
21. BRUNHES (Clermont-Ferrand).
22. BUGUET (Rouen).
23. BUISSON (Marseille).
24. CAILLETET (Paris).
25. CAMICHEL (Toulouse).
26. CARVALLO (Paris).
27. CASSIE (Londres).
28. CHABRIER (Nice).
29. CHAIR (Belfort).
30. CHAMPIGNY (Paris).
31. CHASSAGNY (Paris).
- 31 *bis.* CHRÉTIEN (Saint-Brieuc).
32. COLARDEAU (Paris).
33. COLIN (Paris).
- 33 *bis.* COLIN (Rennes).
34. COLOMBE (Paris).
35. COMBET (Tunis).
36. COTTON (Paris).
37. CROVA (Montpellier).
38. CURIE (Paris).
- 38 *bis.* D'ARSONVAL (Paris).
39. DAUVÉ (Beaune).
40. Le R. P. DECHEVRENS (Jersey).
41. DELVALEZ (Paris).
42. DESGRANGES (Savenay).
43. DEVAUX (Brest).
44. DONGIER (Paris).
- 44 *bis.* DROIT (Paris).
45. A. DUFOUR (Paris).
46. H. DUFOUR (Lausanne).
47. FABRY (Marseille).
48. FARGE (Roanne).
49. FERNIQUE (Paris).
50. FÉRY (Paris).
51. FISCHER (Munich).
52. FOREL (Morges).
53. FOTSCHIDLOVSKY (Odessa).
54. FOUSSEREAU (Paris).
55. FOVEAU DE COURMELLES (Paris).
56. FRÉCAUT (Asnières).
57. GADOT (Paris).
- 57 *bis.* GALLOTTI (Paris).
58. GARIEL (Paris).
59. J. GAY (Paris).
60. GERNEZ (Paris).
61. GHEURY (Manchester).
62. GIBERT (Paris).
63. GIRARDET (Paris).
64. GODEFROY (Paris).
65. GOLDHAMMER (Kazan).
66. GOURÉ DE VILLEMONTÉE (Paris).
67. Le R. P. DE GROOT (Oudenbosch).
68. GUILLAUME (Sèvres).
69. GUTHE (University of Michigan).
70. C.-E. GUYE (Genève).
71. HALLOCH (New-York).
72. HAUDIÉ (Brest).
73. HENRY (Reims).
74. HESEHUS (Saint-Pétersbourg).
75. HILLAIRET (Paris).
76. HOFFMANN (Paris).
77. IZARN (Clermont-Ferrand).
78. JANET (Paris).

79. JARIAS (Bourg).
 80. JOUBERT (Paris).
 81. JUPPONT (Toulouse).
 82. DE KOWALSKI (Fribourg).
 82 *bis.* LANGEVIN (Paris).
 82 *ter.* LAMIRAND (Toulouse).
 83. LAROUSSE (Nevers).
 84. LAURIOL (Paris).
 85. LE BON (Paris).
 86. LEDUC (Nantes).
 87. JULES LEMOINE (Paris).
 88. G. LEMOINE (Paris).
 89. LENOIR (Brest).
 90. LERMANTOFF (St-Petersbourg).
 91. LÉRY (Paris).
 92. LESPIEAU (Paris).
 93. LIMB (Lyon).
 94. LOOSER (Essen).
 95. LUGOL (Paris).
 96. MACÉ DE LÉPINAY (Marseille).
 97. MALTÉZOS (Athènes).
 98. MARAGE (Paris).
 99. MAREY (Paris).
 100. MASCART (Paris).
 101. MASSOULIER (Paris).
 102. MATHIAS (Toulouse).
 103. MATHIEU (Évreux).
 104. MAZOTTO (Sassari).
 105. VAN DER MENNSBRUGGHE (Gand).
 106. MERCANTON (Lausanne).
 106 *bis.* MERLIN (Châlons-s.-Marne).
 107. MÉTRAL (Paris).
 108. MOREAU (Rennes).
 109. MORIN (Montluçon).
 110. M^{lle} MOURGUES (Paris).
 111. MM. MULLIN (Chambéry).
 112. MUNIER (Chaumont).
 113. VON OETTINGER (Leipzig).
 114. OOSTING (Den Helder).
 115. OSSENDOWSKY (Wladivostock).
 116. PELLAT (Paris).
 117. PÉROT (Paris).
 118. PERREAU (Besançon).
 119. PERRIN (Paris).
 120. PETIT (Foix).
 121. PHILIPPE (Bourges).
 122. H. POINCARÉ (Paris).
 123. L. POINCARÉ (Paris).
 123 *bis.* POITEVIN (Paris).
 124. POTIER (Paris).
 125. RAVEAU (Paris).
 126. REMY (Rennes).
 127. REVOY (Limoges).
 128. ROGER (Épernay).
 129. ROLLAND (Poitiers).
 130. DE ROMILLY (Paris).
 130 *bis.* ROUBAULT (Sedan).
 131. SACERDOTE (Paris).
 132. SAGNAC (Lille).
 133. SANDOZ (Paris).
 133 *bis.* V. SCHAFFERS (Louvain).
 134. SCHURR (Montluçon).
 135. SCHWEDOFF (Odessa).
 136. SELLA (Rome).
 137. SERRES (Paris).
 138. SIRE (Besançon).
 139. STARLING (Londres).
 140. STEWART (Newport).
 141. STROUHAL (Prague).
 142. SWYNGEDAuw (Lille).
 143. TERRIER (Laval).
 144. DE THAN (Budapesth).
 144 *bis.* S.-P. THOMPSON (Londres).
 144 *ter.* THOUVENEL (Paris).
 145. TIAN (Marseille).
 145 *bis.* TROUSSEWITCH (Varsovie).
 146. TURPAIN (Poitiers).
 147. VAISSIÈRES (Carcassonne).
 148. M^{lle} VENOT (Lyon).
 149. MM. VILLARD (Paris).
 150. VINCENT (Paris).
 151. VIOLLE (Paris).
 152. VUILLET (Grenoble).
 153. WEINBERG (Odessa).
 154. P. WEISS (Zurich).
 154 *bis.* ZILOFF (Varsovie).

INDEX BIBLIOGRAPHIQUE.

155. Agenda du chimiste.
156. ALDOUS, An elementary course of physics.
157. AMES et BLISS, A manual of experiments in physics.
158. Annuaire de Photographie (1903).
159. ARMAGNAT, Instruments et méthodes de mesures électriques.
160. BARNES, Practical acoustics.
161. BOUANT, Cours de Physique.
162. BOUASSE, Mécanique et Physique.
163. BOYS, Bulles de savon (Trad. Guillaume).
164. BUIGNET, Manipulations de Physique.
165. BURGESS, Experimental physics.
166. CASTLE, Elementary practical physics.
167. CHASSAGNY, Cours élémentaire de Physique.
168. CREW et TATNALL, Laboratory manual of physics.
169. DAMIEN et PAILLOT, Manipulations de physique.
- 169 *bis*. DUFET, Données numériques.
170. EARL, Practical lessons in physical measurement.
171. FARADAY, Manipulations chimiques (Trad. Maiseau et Bussy).
172. GAGE, Physical experiments; a manual and notebook.
- 172 *bis*. GOSSELIN, Manipulations d'électricité industrielle.
173. GREGORY, Exercise book of elementary practical physics.
174. GREGORY et SIMMONS, Exercises in practical physics.
175. HADLEY, Practical exercises in magnetism and electricity.
176. HALL, Descriptive list of elementary exercises for admission to Harvard College.
177. HOSPITALIER, Recettes de l'électricien.
178. HOSPITALIER, Formulaire de l'électricien.
179. HUGUENIN, Aide-mémoire de l'ingénieur.
180. JAMIN et BOUTY, Cours de Physique.
181. JOUBERT, Traité élémentaire d'Électricité.
182. Journal de Physique.
183. Journal de Physique élémentaire.
184. LORD KELVIN, Conférences scientifiques et allocutions (Trad. Lugol).
185. KOHLRAUSCH, Guide de Physique pratique (Trad. Thoulet et Lagarde).
186. KOENIG, Quelques expériences d'Acoustique.
187. LANDOLT et BÖRNSTEIN, Physikalisch-chemische Tabellen.
188. LEBLANC, Les sciences physiques à l'école primaire.
- 188 *bis*. LONDE, Traité pratique de Radiographie.
189. LUMIÈRE, La Photographie; deux brochures, Bibliothèque scientifique des écoles et des familles.
190. MAXWELL, La chaleur (Trad. Mouret).

191. **MAYER**, Sound.
192. **MAYER** et **BARNARD**, Light.
193. **MERGIER**, Manipulations de Physique.
194. **NICHOLS**, Laboratory manual of physics and applied electricity.
195. **NICHOLS**, **SMITH** et **TURTON**, Manual of experimental physics.
196. **PETITOT**, Le laboratoire scolaire.
197. **PICKERING**, Physical manipulation.
198. **RAOULT**, Tonométrie (Coll. Scientia).
199. **RAOULT**, Cryoscopie (Coll. Scientia).
200. **ROBSON**, Practical exercises in heat.
201. **SCHUSTER** et **LEES**, Intermediate course of practical physics.
202. **SCHUSTER** et **LEES**, Advanced exercises in practical physics.
203. **STEWART** et **GEE**, Elementary practical physics.
204. Syllabus of the course of practical instruction in physics at the Royal College of Science South Kensington.
205. **TERQUEM** et **DAMIEN**, La Physique expérimentale.
206. **S.-P. THOMPSON**, Light visible and invisible.
207. **THERELFALL**, On laboratory arts.
208. **TYNDALL**, La chaleur (Trad. Abbé Moigno).
209. **VIDAL**, Traité pratique de Photochromie.
210. **VIOLLE**, Cours de Physique.
211. **WALLON**, Choix et usage des objectifs photographiques.
212. **WEINHOLD**, Experimental physics.
213. **WENTWORTH** et **HILL**, Laboratory exercises in elementary physics.
214. **WIEDEMANN** et **EBERT**, Physikalisches Praktikum.
215. **WILBERFORCE** et **FITZPATRICK**, A laboratory note-book of elementary practical physics.
216. **WITZ**, Manipulations de Physique.
217. **WOOLCOMBE**, Practical work in physics.
218. **WORTHINGTON**, Physical laboratory practice.



RECUEIL D'EXPÉRIENCES

ÉLÉMENTAIRES DE PHYSIQUE.

CHAPITRE V.

ACOUSTIQUE.

MODÈLES MÉCANIQUES POUR MONTRER LA PROPAGATION DES ONDES ET LA FORMATION DES ONDES STATIONNAIRES.

1. Ondes longitudinales. — Construire un long ressort à boudin (400 spires $D = 3^{\text{cm}}$); avec du fil de fer de $0^{\text{cm}}, 1$ (**I, 20**). Suspendre cette hélice de fil de fer verticalement par l'une de ses extrémités sous le bord d'une étagère. Égaliser autant que possible les distances des spires successives et placer entre ces spires des index horizontaux de paille ou de papier à 10^{cm} les uns des autres ($l = 15^{\text{cm}}$). Prendre alors dans la main l'extrémité inférieure du ressort sans exercer d'effort de traction.

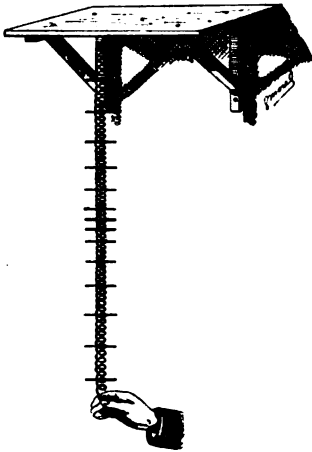
Quand on déplace brusquement la main dans le sens vertical, il se produit une onde longitudinale qui se propage le long de l'hélice et se réfléchit successivement aux deux extrémités. On mesurera

A., II.

la vitesse de propagation V en déterminant le nombre des réflexions successives qui se produisent pendant un certain temps.

Donner ensuite à la main un mouvement vertical alternatif dont on augmentera progressivement la fréquence.

Pour une période plus longue que $\frac{4l}{V}$, la force que le ressort exerce sur la main est constamment dirigée vers sa position initiale; autrement dit, il y a concordance de phase entre la force et le mouvement.



Quand on arrive vers la période $\frac{4l}{V}$, il n'y a presque aucun effort à exercer pour entretenir un mouvement d'assez grande amplitude de l'extrémité qu'on tient à la main. On constatera même que, abandonné à lui-même, le ressort continuerait ce mouvement qui est son oscillation propre, donnant ainsi l'image des vibrations de l'air dans un tuyau fermé qui rend le son fondamental.

En continuant encore à augmenter la vitesse, la force sera d'abord en opposition de phase avec le mouvement, puis une seconde résonance se produira pour la période $\frac{2l}{V}$. Mais l'onde stationnaire que l'on obtient alors possède un nœud à chaque extrémité; c'est-à-dire que, bien que les efforts exercés sur la main soient assez intenses, les déplacements de la main n'ont besoin que d'être beaucoup plus petits que ceux qui se produisent au milieu du ressort. On constatera même que, si l'on arrête complètement la main, le ressort continue ce mouvement qui est encore un régime d'oscillation propre.

En augmentant de nouveau la vitesse, le ressort se partagera en deux segments séparés par un nœud. Ce nœud remontera progressivement à mesure que la vitesse croîtra et l'on obtiendra des résonances de la première espèce ou de la seconde pour des fréquences qui se succéderont comme celles des harmoniques des tuyaux fermés ou ouverts (114, 117, 135).

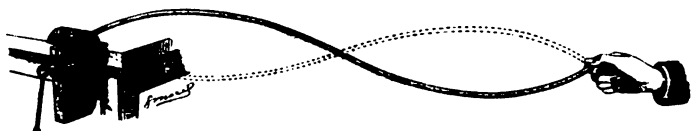
2. Vibrations tournantes. — Le même dispositif permet d'é-

tudier d'une manière toute semblable les vibrations tournantes que l'on imprimera au ressort suspendu en agissant avec la main sur la partie inférieure.

3. Ondes transversales. — On pourrait encore se servir du même ressort que pour les expériences précédentes, mais il vaudra mieux se procurer un tube de caoutchouc à gaz d'une longueur de plusieurs mètres dont on fixera une extrémité dans un étau, en tenant l'autre extrémité à la main de manière à tendre légèrement le tube. Au besoin, on pourrait même se servir d'une corde mince telle qu'un cordon de tirage pour rideaux.

Quand on déplace brusquement la main dans une direction perpendiculaire au tube de caoutchouc, il se produit une onde transversale qui se propage le long du tube et se réfléchit avec changement de signe à l'extrémité fixe. En envoyant une deuxième onde pendant le retour de la première, on observe qu'elles interfèrent en un point et qu'elles se traversent ensuite.

On s'assurera que ces ondes ont une vitesse indépendante de leur forme, qui peut être par exemple rectiligne ou circulaire, mais que cette vitesse augmente avec la tension du tube de caoutchouc.



— En donnant à la main un mouvement transversal alternatif ou circulaire, on produira avec la plus grande facilité des *ondes stationnaires* à vibrations rectilignes ou circulaires qui auront un nœud à chaque extrémité du tube et pourront avoir un ou plusieurs nœuds intermédiaires (2, 17, 135).

4. Décomposition d'un système vibrant. — Prendre deux tubes de caoutchouc ayant l'un 5^m, l'autre 6^m et les fixer ensemble dans un étau par une de leurs extrémités. Tirer sur le tube le plus court jusqu'à ce qu'il ait la même longueur que le plus long et tourner les deux tubes ensemble de manière à les enrouler de quelques tours l'un sur l'autre.

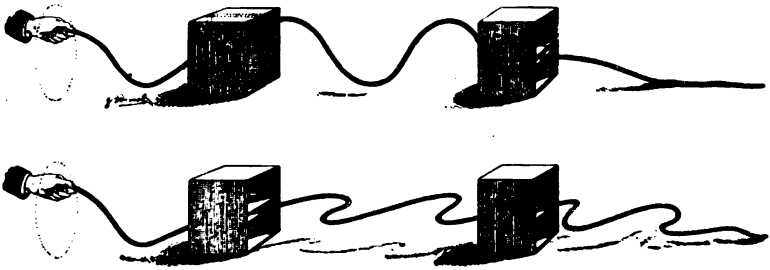
Si l'on vient à faire osciller fortement ce cordon mixte avec la fréquence qui aurait été nécessaire pour former trois ondes stationnaires dans le tube de 5^m, on constatera que les deux tubes se sépa-

reront pendant l'oscillation et qu'ils ne se *recombineront* plus complètement quand le mouvement s'arrêtera (135).

5. Ondes polarisées. — Préparer deux cadres de bois ($40^{\text{cm}} \times 40^{\text{cm}}$) faits avec des planches de 22^{cm} sur $1^{\text{cm}},5$ et fixer dans chacun d'eux deux tablettes séparées par un intervalle de $2^{\text{cm}},5$. Passer un tube de caoutchouc de plusieurs mètres de long dans la fente de l'un des cadres et fixer ce tube par un bout dans un étau.

Prendre ce tube avec la main par l'autre bout et lui imprimer un mouvement transversal quelconque, circulaire par exemple. Il ne sort du *polariseur* qu'un mouvement transversal rectiligne.

En plaçant les deux cadres sur le tube, un mouvement circulaire transformé par le polariseur en mouvement rectiligne ne



passera à travers l'*analyseur* que si les *sections principales* sont parallèles; et rien ne passera si les sections principales sont croisées (156, 182, 206).

ONDES A LA SURFACE DE L'EAU.

6. Montage. — Préparer une grande cuve plate à fond de verre, pour laquelle on prendra, par exemple, la porte d'une armoire vitrée que l'on rendra étanche en appliquant du mastic de vitrier sur tous les joints. Poser cette cuve horizontalement en la faisant porter sur le bord de deux tables de même hauteur et y verser de l'eau sur une hauteur de 1^{cm} ou 2^{cm} . Placer enfin sous la cuve un arc électrique ou un chalumeau oxyhydrique de manière à projeter sur le plafond l'ombre de la nappe liquide.

Au lieu d'observer les ombres sur le plafond, on pourra les pro-

jeter sur un écran vertical en renvoyant la lumière horizontalement au moyen d'un miroir plan ($60^{\text{cm}} \times 70^{\text{cm}}$) placé à 45° au-dessus de la cuve. — On pourrait encore observer ces ombres sur un écran blanc incliné au-dessus de la cuve, et, dans ce cas, la moindre source de lumière, une bougie même, serait suffisante.



Si l'expérience ne doit être vue que par un petit nombre de personnes, on peut se contenter d'opérer en plein jour et de coller du papier blanc sous la cuve : les ondes projeteront sur le papier des ombres suffisamment nettes pour qu'on puisse les étudier (46, 82, 195, 206).

7. Propagation des ondes. — Toucher la surface de l'eau au centre de la cuve avec un objet quelconque ; des rides circulaires concentriques se propageront à partir du point touché. Produire de la même manière une série d'ondes concentriques et constater

que deux trains d'ondes, partis de centres d'ébranlement distincts, se traversent sans altération.

8. Réflexion. — Placer dans la cuve une lame de zinc ($h = 5^{\text{cm}}$; $e = 0^{\text{cm}}, 05$) droite ou courbée à peu près en forme de parabole. Produire en avant de ce *miroir* des ondes circulaires, étudier leur réflexion et la formation d'ondes réfléchies divergentes, convergentes ou rectilignes.

9. Diffraction. — Placer au milieu de la cuve deux baguettes de bois ($25^{\text{cm}} \times 3^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}$) l'une à la suite de l'autre, en laissant entre elles un intervalle de 4^{cm} ou 5^{cm} . Produire des ondes circulaires à partir d'un point situé à 10^{cm} ou 15^{cm} de cette ouverture : puis étudier la manière dont les ondes se propagent au delà de l'ouverture, et notamment l'existence des ondes en dehors de l'angle défini par le centre d'ébranlement et par les bords de cette ouverture. — Étudier de même la diffraction des ondes par deux ouvertures séparées par un intervalle opaque égal à leur largeur (4^{cm}) et constater encore la pénétration des ondes à l'intérieur de l'*ombre géométrique*.

10. Interférences. — Produire deux trains d'ondes circulaires synchrones en agissant simultanément avec deux doigts sur la nappe d'eau et noter la forme des courbes sur lesquelles les deux mouvements interfèrent. — Produire aussi des ondes stationnaires en soulevant et en abaissant alternativement une carte verticale placée dans la cuve en face d'une baguette rectiligne figurant un miroir plan.

— Les expériences sur les ondes périodiques se font avec une plus grande régularité en produisant ces ondes au moyen d'une tige de fer recourbée (aiguille à tricoter; $d = 0^{\text{cm}}, 1$) que l'on fixe au trembleur d'une sonnerie électrique.

— On obtiendrait une démonstration encore plus complète de tous ces phénomènes périodiques en plaçant tout près de la source de lumière un disque mobile percé d'ouvertures équidistantes qui permettrait une observation stroboscopique des ondes (V, 35).

SYNCHRONISATION ET RÉSONANCE DES VIBRATIONS LENTES.

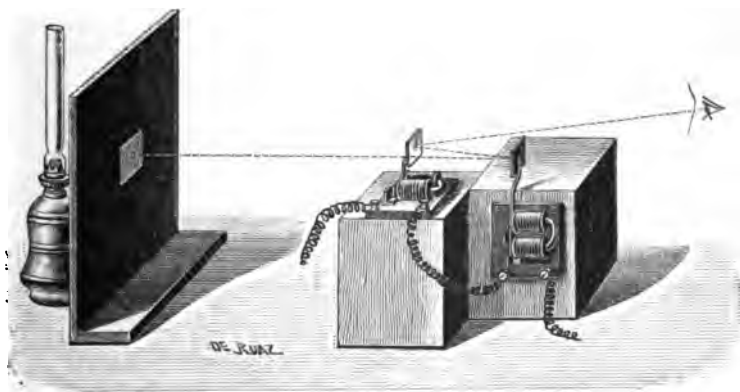
11. Synchronisation par entretien électrique des vibrations. — *Montage.* — Se procurer deux sonneries électriques

d'un même modèle, retirer leurs timbres et mettre un miroir plan ($2^{\text{cm}} \times 2^{\text{cm}}$) sur le marteau de chacune d'elles, perpendiculairement au plan de vibration, en le faisant tenir avec de la cire molle. Fixer ensuite ces deux sonneries contre des supports (caisses en bois; $h = 20^{\text{cm}}$) de manière que l'un des axes de rotation soit vertical et l'autre horizontal.

Mettre les sonneries dans le circuit d'un accumulateur ou d'une pile, en établissant les connexions de l'une des sonneries à la manière habituelle, tandis que, pour l'autre, le courant est envoyé directement dans l'électro-aimant sans passer par le système interrupteur.

Préparer enfin un *point lumineux* soit en adoptant les dispositions indiquées par la figure, soit en construisant un écran fait d'une feuille de zinc noircie ($40^{\text{cm}} \times 40^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}}, 1$) fixée contre un pied en bois ($40^{\text{cm}} \times 10^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}, 8$) et dans laquelle on perce un trou ($d = 0^{\text{cm}}, 5$) qui sera éclairé par derrière au moyen d'une flamme quelconque.

Expériences. — Installer le *point lumineux* à 1^{m} ou 2^{m} de distance et disposer les deux sonneries, leurs miroirs se faisant face.



de manière qu'en regardant dans le second miroir on aperçoive l'image deux fois réfléchi du point lumineux. Avant d'établir le courant, on constatera que lorsqu'on fait vibrer à la main l'un des miroirs, puis l'autre, l'image oscille soit dans le sens vertical, soit dans le sens horizontal.

Quand on ferme le circuit électrique, la première sonnerie inter-

rompt périodiquement le courant, et ce courant interrompu agit sur la seconde sonnerie. Mais comme les périodes ne sont pas nécessairement identiques, les vibrations de cette sonnerie *réceptrice* ont, en général, une très faible amplitude.

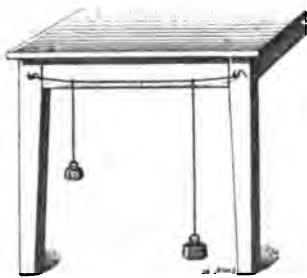
En alourdisant progressivement avec de la cire molle l'un des systèmes vibrants, convenablement choisi, on imprime à la sonnerie réceptrice des vibrations de plus en plus fortes. On obtient un maximum d'amplitude au moment où, les périodes propres des deux sonneries étant égales, le phénomène de résonance se produit. Pour les expériences voisines de la résonance, on observe la production d'un régime transitoire, caractérisé par des battements, et auquel le régime régulier succède quand les vibrations propres de la sonnerie réceptrice se sont éteintes.

— Faisant enfin l'observation optique, on notera les formes que présente la trajectoire de l'image du point lumineux. On aura soin de ne pas laisser les lames vibrantes heurter les parties fixes des sonneries, car il se produirait alors des trépidations complexes qui troubleraient la forme simple des courbes brillantes.

— Une fois le régime permanent obtenu, l'observation optique montrera que la *vibration forcée* de la sonnerie réceptrice a toujours la période de la vibration motrice. Mais les deux vibrations seront en concordance presque exacte ou en opposition de phase selon que l'on sera d'un côté ou de l'autre de la résonance.

— Après chacune de ces expériences, et, en particulier après les expériences de résonance, on supprimera le courant électrique et l'on continuera l'observation optique pour faire la comparaison des périodes d'oscillation propre des deux sonneries.

12. Synchronisation et transmission des mouvements pendulaires par les supports. — *Montage.* — Tendre un fil



devant le bord de la table et y suspendre deux pendules constitués par des *poids* en fonte de 50^g ($l = 30\text{cm}$) et de 200^g ($l = 60\text{cm}$) suspendus par des fils de cuivre fin ($d = 0,03\text{cm}$).

Faire osciller le pendule le plus long. Observer la transmission des oscillations au pendule court, leurs interférences avec les oscillations propres de ce pendule et les battements persistants qui en résultent.

— Répéter l'expérience en introduisant un amortissement notable du petit pendule, en le faisant plonger, par exemple, dans de l'eau contenue dans une assiette creuse. On observera une synchronisation rapide et la *concordance de phases* presque complète entre l'oscillation motrice et l'oscillation synchronisée.

— Faire osciller de même le petit pendule en laissant le grand pendule osciller dans l'air; puis en faisant osciller le grand pendule dans l'eau. Dans le premier cas, on aura encore des battements. Dans le second cas la synchronisation se fera avec *opposition des phases* des deux pendules.

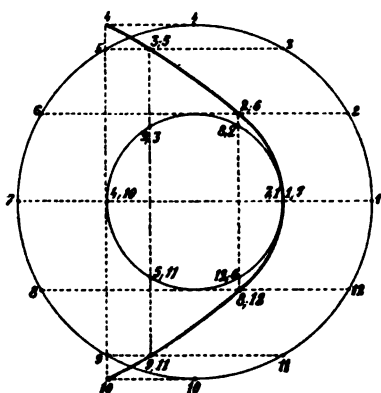
Cas limite. — Si les deux pendules sont presque identiques, et si on lance l'un d'eux pendant que l'autre est au repos, il se produira une transmission intégrale et alternative du mouvement d'un pendule à l'autre. Si, au contraire, on lance les deux pendules ensemble, leur mouvement commun se continuera sans arrêt (68, 140).

COMPOSITION DE DEUX MOUVEMENTS VIBRATOIRES RECTANGULAIRES.

13. Tracé par points d'une courbe de Lissajous. — Tracer deux circonférences concentriques ayant pour rayons les amplitudes des mouvements. A partir d'un rayon quelconque, partager l'une des circonférences en un certain nombre (12) de parties égales et numérotter les points de division.

Faire de même pour la seconde circonférence en laissant entre les rayons origines un angle égal à la différence de phase et numérotter encore les points de division en les prenant soit l'un après l'autre, soit de 2 en 2 ou de 3 en 3, suivant le rapport des périodes.

Mener des horizontales par les points marqués sur la première



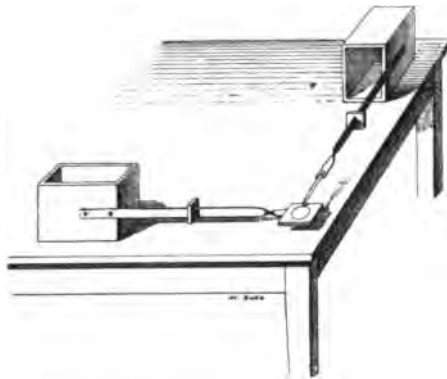
circonférence et des verticales par les points correspondants de la seconde et tracer le lieu des points de rencontre. — On construira notamment les ellipses résultant de la combinaison de deux mouvements de même période avec des différences de phases diverses.

La figure correspond au cas de l'octave sans différence de phase avec un rapport des amplitudes égal à 2 (193).

14. Étude d'un mouvement relatif par les figures de Lissajous. — *Montage.* — Préparer deux ressorts plats en acier ($50^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}, 5 \times 0^{\text{cm}}, 15$).

Détremper les deux ressorts à une extrémité sur une longueur de 5^{cm} pour y percer deux trous ($d = 0^{\text{cm}}, 5$), les tordre à angle droit à 6^{cm} de l'autre extrémité en opérant au rouge sombre, et visser horizontalement les deux ressorts à la même hauteur sur deux supports (caisses en bois, $h = 20^{\text{cm}}$).

Coller une lame de verre ($8^{\text{cm}} \times 8^{\text{cm}}$) sur l'extrémité horizontale



de l'un des ressorts; enfumer une autre lame semblable et la faire tenir sur la première avec de la cire molle.

Découper un style ($12^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}}, 5$) dans une feuille d'acier mince ($0^{\text{cm}}, 01$); détremper ce style sur une longueur de 2^{cm} à l'extrémité opposée à la pointe; le faire tenir sur l'autre ressort en le recouvrant d'une petite lame de bois mince collée sur la lame d'acier et régler la pression du style sur le verre enfumé à 1^{mm} ou 2^{mm} de flexion seulement.

Donner un trait de scie dans des plaques de plomb ($5^{\text{cm}} \times 5^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}$) pour en faire deux cavaliers pouvant glisser le long des ressorts.

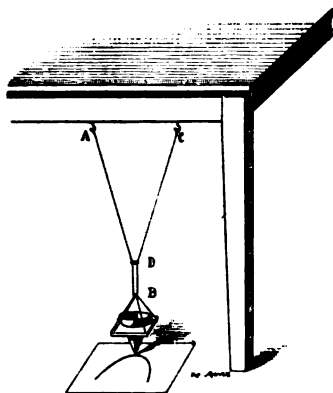
Une fois placés, ces curseurs devront être *calés* pour qu'ils ne puissent pas trépidier pendant les oscillations.

Expériences. — Régler la position des curseurs pour donner la même période aux oscillations des deux ressorts, observer l'inscription de la ligne droite et des ellipses, et l'amortissement des oscillations.

Établir ensuite une faible différence de période pour obtenir l'inscription de l'ellipse tournante.

Établir enfin un rapport simple entre les périodes et tracer une figure de Lissajous.

15. Mouvement résultant. — *Montage.* — Préparer une plaque de plomb ($7^{\text{cm}} \times 7^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}$) avec une ouverture centrale tronconique ($D = 5^{\text{cm}}$, $d = 4^{\text{cm}}$), et percer, aux quatre coins, des trous ($d = 0^{\text{cm}}, 5$) dans lesquels on passera un fil de cuivre fin ($d = 0^{\text{cm}}, 03$, $l = 45^{\text{cm}}$). Suspendre le tout à un fil semblable ABC attaché à deux anneaux de laiton ($d = 1^{\text{cm}}, 5$) passant dans deux crochets A et C ($AC = 20^{\text{cm}}$) fixés sous le bord de la table. Nouer un fil D pouvant glisser le long de la suspension ABC.



Placer dans la plaque de plomb un cornet en zinc ($D = 7^{\text{cm}}$, $l = 8^{\text{cm}}$, $e = 0^{\text{cm}}, 05$) dont la pointe a été coupée ($d = 0^{\text{cm}}, 2$) et régler la longueur de la suspension de manière que la pointe du cornet soit à quelques millimètres du sol.

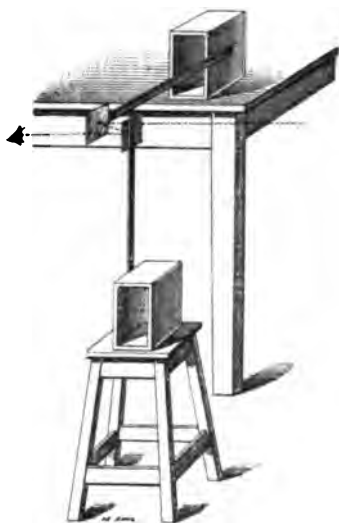
Expérience. — Garnir l'entonnoir de sable sec finement tamisé.

Mesurer la durée de l'oscillation autour de AC, puis autour de D. Régler alors la position du curseur D de manière à établir entre ces durées un rapport simple, $\frac{1}{2}$ par exemple : le sable, en s'écoulant, tracera la courbe correspondante (44, 157, 193).

16. Observation optique des figures de Lissajous. — Visser deux ressorts plats (50^{cm} ; $1^{\text{cm}}, 5$; $0^{\text{cm}}, 15$) sur des supports (caisses en bois $h = 20^{\text{cm}}$) et fixer un miroir plan ($3^{\text{cm}} \times 3^{\text{cm}}$) à l'extrémité de chacun de ces ressorts.

Placer l'un des supports-caisses sur une table haute, de manière que le ressort soit horizontal. Mettre l'autre support sur un

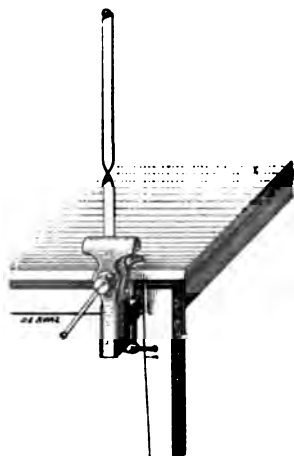
tabouret, de manière que le ressort soit vertical et que les deux miroirs soient parallèles et peu éloignés (15^{cm}).



En observant à l'œil nu un point brillant éloigné (bille d'acier) par réflexion sur les deux miroirs, ce point semblera décrire la courbe étudiée (119, 193).

— Faire porter par ces mêmes ressorts, deux plaques de zinc ($6^{\text{cm}} \times 6^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}},05$) percées chacune d'une fente longitudinale ($l=4^{\text{cm}}$, $e=0^{\text{cm}},05$). Faire vibrer les ressorts très près l'un de l'autre avec une grande amplitude et regarder un fond bien éclairé à travers le système des deux lames, en plaçant l'œil un peu loin; on verra encore se dessiner la courbe cherchée.

17. Vibration mixte. — Une lame d'acier ($30^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}},05$) est tordue à angle droit vers le quart de sa longueur. On la tient

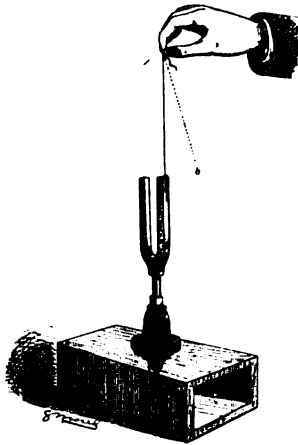


dans un étau et l'on fixe à la cire molle une bille d'acier à l'autre extrémité. En descendant plus ou moins le ressort entre les mâchoires de l'étau, on établira un rapport simple entre les périodes

que l'on obtient en faisant osciller le ressort dans les directions principales. On observera alors la courbe que décrit la sphère brillante (172).

VIBRATIONS SONORES.

18. Vibrations des corps solides. — Faire rendre un son à un timbre, une verge, un diapason, un instrument à cordes, etc.



et constater à la main leurs vibrations. On pourra montrer ces vibrations au moyen d'un petit pendule fait d'un fort grain de



plomb attaché au bout d'un fil, ou bien approcher le corps vibrant de la surface de l'eau contenue dans une assiette : le grain de plomb

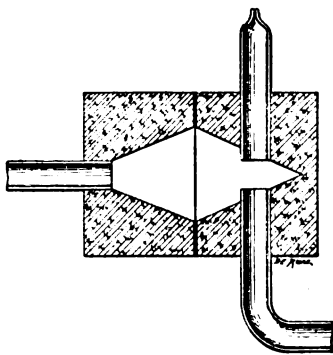
ou l'eau seront violemment projetés (191). — On pourra aussi placer un miroir sur le corps vibrant et observer le mouvement d'une image réfléchie en l'étudiant, par exemple, avec un miroir tournant (voir ci-dessous).

19. Flammes manométriques. — *Capsules manométriques.* — Se procurer une petite boîte en bois ($D = 4^{\text{cm}}$; $h = 2^{\text{cm}}$) telle qu'une bonbonnière ou une boîte pour menues fournitures d'horlogerie et donner un peu de jeu ($0^{\text{cm}}, 05$) à l'emboîtement du couvercle. Percer deux trous dans le fond de la



boîte et un trou dans le couvercle, et y ajuster des tubes de verre ($l = 4^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 8$) à frottement doux. — Faire à mi-hauteur de la boîte une rainure circulaire ($0^{\text{cm}}, 2$) et fixer sur cette boîte une feuille de caoutchouc légèrement tendue et aussi mince que possible ($e < 0^{\text{cm}}, 1$). On fera tenir cette membrane au moyen d'une ligature faite de quelques tours de fil à coudre (n° 60)

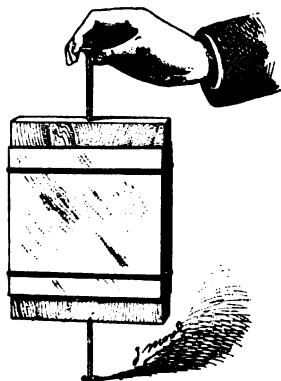
serrant la feuille de caoutchouc dans la rainure. Mettre enfin le couvercle en place et le fixer à la boîte avec des bracelets de caoutchouc.



— On construit encore très aisément de ces capsules manométriques en collant une membrane de caoutchouc entre deux morceaux de liège convenablement taillés, comme ceux que représente la

figure ci-contre, faite en demi-grandeur d'exécution.

Miroir tournant. — Découper deux morceaux égaux de glace argentée ($15^{\text{cm}} \times 15^{\text{cm}}$) et les attacher de part et d'autre d'une planchette ($20^{\text{cm}} \times 15^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}$), soit avec des baguettes de bois vissées contre la planchette, soit tout simplement avec des bracelets de caoutchouc. Pour déterminer l'axe de rotation, on plantera dans la planchette deux gros clous sans tête ($l = 8^{\text{cm}}$) (98, 186, 191, 212).



Expériences. — Envoyer dans la capsule un courant de gaz d'éclairage. Allumer ensuite ce gaz à l'extrémité d'un tube de verre étiré en pointe ($D = 0^{\text{cm}},8$; $d = 0^{\text{cm}},1$) et régler la flamme à une hauteur de quelques centimètres. Adapter au tube qui traverse le couvercle de la capsule un tube de caoutchouc ($l = 50^{\text{cm}}$) qui servira à explorer le champ de vibrations.

On étudiera ainsi l'air qui vibre dans l'intérieur de la bouche pendant que l'on émet un son avec la bouche ouverte ou fermée. On pourra aussi mettre la capsule en communication avec un tube de verre fixé par un bouchon dans la tubulure d'un flacon tubulé ($V = 0^{\text{l}},5$) et faire *parler* ce flacon en envoyant un courant d'air sur le goulot.

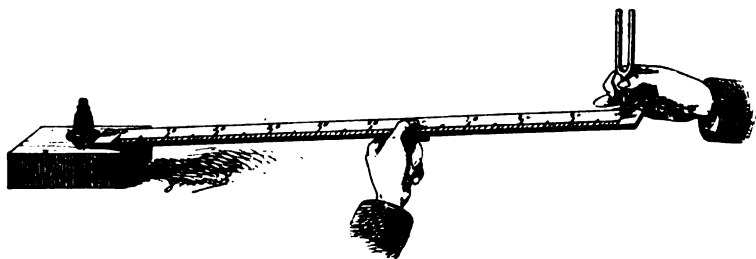
Pour constater les vibrations de la flamme il suffit de déplacer rapidement l'œil pendant qu'on regarde cette flamme; ou bien encore, on déplace la flamme elle-même en la faisant tourner lentement au moyen du caoutchouc qui lui amène le gaz. Du reste, la flamme rend souvent un son très net à l'unisson du son excitateur. — Mais le mieux est de regarder l'image de la flamme dans le miroir tournant.

Si l'on alimente l'appareil avec de l'acétylène (**VI, 2**) les flammes seront assez brillantes pour que l'on puisse photographier les lignes lumineuses dentelées que l'on aperçoit dans le miroir tournant (98).

TRANSMISSION ET RÉFLEXION DU SON.

20. Transmission par les corps solides. — Prendre un diapason dans la main, le mettre en vibration et transmettre le son

à sa caisse de résonance ou à une boîte quelconque, à un battant de porte, à une table, etc., au moyen d'une barre rigide (mètre) qui sera appliquée fortement contre la queue du diapason et



contre l'objet auquel on veut transmettre le son. — On obtient des effets particulièrement frappants en transmettant le son d'un violon à la caisse d'harmonie d'un autre violon placé dans une salle voisine, par l'intermédiaire d'une longue perche suspendue par des fils, passant à travers les cloisons sans les toucher et sur laquelle on appuie les caisses des deux violons.

— Quand un diapason vibre très doucement on peut entendre un son intense en mordant la queue du diapason : le son se transmet aux oreilles par les dents et les os du crâne.

21. Transmission par les fils. — On entend très forte-



ment les vibrations d'un solide en le suspendant au milieu d'un fil aboutissant aux deux oreilles. — On peut converser à voix

basse à une assez grande distance au moyen du *téléphone à ficelle*. On le construit aisément avec deux ronds de serviette, du papier parchemin et du gros fil, qui devra être assez fortement tendu pour pouvoir bien transmettre le son.

22. Corps mous et corps liquides. — Le son peut se transmettre d'un diapason à sa caisse de résonance avec plus ou moins d'intensité par l'intermédiaire de morceaux de liège, de caoutchouc



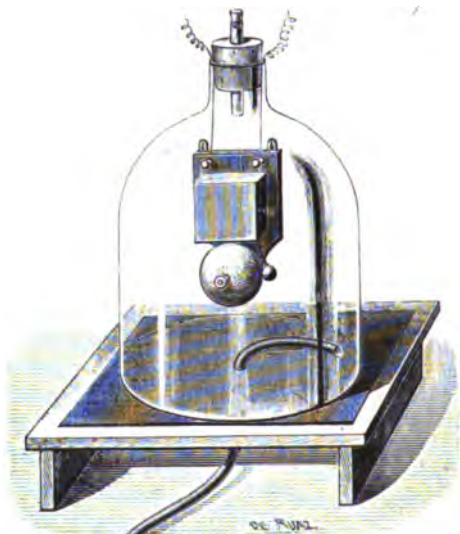
ou de plomb. — On transmet aussi les vibrations du diapason jusqu'à sa caisse de résonance à travers de l'eau contenue dans un verre. Mais on n'entendrait presque rien en mettant directement la queue du diapason dans l'eau : il faut avoir soin ou bien de plonger l'une des branches du diapason dans l'eau, ou bien de munir la queue d'un disque solide (bouchon) que l'on plongera dans l'eau.

— On peut encore montrer la *production* d'un son dans l'eau en



plaçant une flûte en fer-blanc ($l = 40^{\text{cm}}$) dans un seau et en la faisant résonner au moyen d'un courant d'eau (74, 191).

23. Transmission par différents gaz. — Suspendre une sonnerie dans l'intérieur d'une cloche à douille. On la tient par les fils métalliques que l'on mastique dans le bouchon à travers lequel passe, en outre, un tube de verre. La cloche repose sur un tabouret percé d'un trou, par l'intermédiaire d'une feuille de caoutchouc un peu épaisse ou d'une plaque de feutre.



Si l'on introduit du gaz d'éclairage ou de l'hydrogène par le tube de verre qui traverse le bouchon, en ayant bien soin de remplir complètement la cloche pour que les étincelles de rupture de la sonnerie ne puissent pas provoquer d'explosion, on constatera que le son de la sonnerie est beaucoup affaibli. Le son est renforcé, au contraire, si l'on remplit la cloche avec du gaz carbonique, qu'on introduira par un tube de caoutchouc débouchant en bas de la cloche (77).

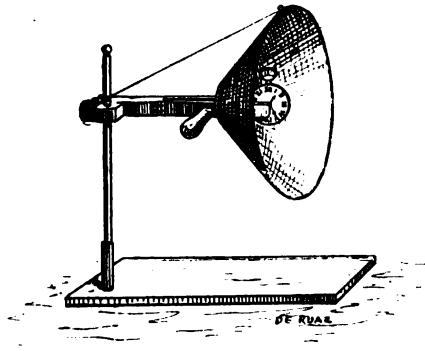
24. Transmission par les gaz raréfiés. — Suspendre un grelot ou une clochette au centre d'un ballon ($V = 3^l$) au moyen d'une tige métallique ($D = 3^{mm}$) passée dans le bouchon, en interposant un anneau de cuir ou de caoutchouc ($l = 2^{cm}$) entre la tige et la clochette. Mettre ensuite un peu d'eau dans le ballon, la faire bouillir une minute et fermer le ballon au moment même où l'on éteint le feu. Après refroidissement, on constatera que les

vibrations produites dans le ballon ne sont presque plus entendues à l'extérieur, alors qu'on les entend nettement quand on



laisse rentrer l'air. — Il est bien clair que l'on pourrait aussi faire le vide dans le ballon avec une machine pneumatique ou une trompe à eau.

25. Réflexion du son. — Si l'on ne dispose pas d'un grand miroir concave, on pourra prendre comme réflecteur un abat-jour en carton, qui permettra d'entendre le tic-tac d'une montre à 15^m



de distance. La montre devra être placée sur l'axe un peu en arrière du plan de la grande base.

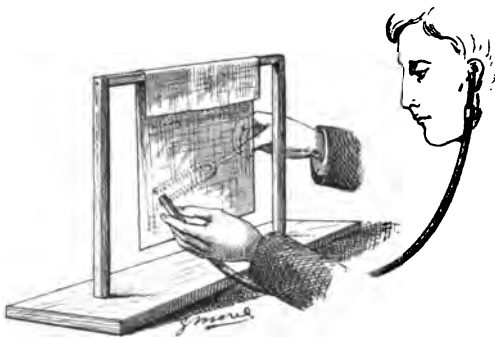
La portée du son est encore augmentée si, à l'arrivée, on rassemble les ondes sonores à l'aide d'un autre réflecteur. On prend, par exemple, pour récepteur, une feuille de papier fort roulée en forme de cône d'angle aigu ($D = 12^{\text{cm}}$; $h = 40^{\text{cm}}$) dont on coupe la pointe ($d = 0^{\text{cm}}, 5$) pour l'introduire dans l'oreille.

Flammes sensibles. — On peut encore montrer l'arrivée d'un son à l'aide de certaines flammes sur lesquelles agissent les sons aigus (la_3), les sifflements, les sons des lettres sifflantes, le choc de petits objets métalliques, etc. La flamme tranquille ($h = 50^{\text{cm}}$) s'écrase en un panache ronflant ($h = 25^{\text{cm}}$) sous l'influence des sons actifs.

On obtient ces flammes en allumant un jet de gaz à l'extrémité d'un tube étiré de diamètre convenable. Pour les pressions usuelles du gaz des villes, le diamètre devra être aussi voisin que possible de $0^{\text{cm}}, 2$ et le robinet du gaz ouvert en plein.

L'expérience est plus facile à réaliser si l'on emploie de l'hydrogène dont on rend la flamme éclairante en faisant barboter le gaz dans de la benzine. Cet hydrogène est préparé dans un appareil à deux flacons qui permet de régler la pression du gaz à la valeur qui donne le maximum de sensibilité (77, 133, 182).

26. Transmission et réflexion. — Suspendre verticalement un morceau d'étoffe et s'assurer qu'il se laisse traverser par le son.



L'observation se fera en tenant à la main un diapason sans caisse de résonance et en écoutant à travers l'étoffe au moyen d'un tube explorateur (V, 30) aboutissant à l'oreille ($l = 80^{\text{cm}}$; $D = 0^{\text{cm}}, 8$). Répéter ensuite l'expérience avec la même étoffe mouillée et constater que le son est presque complètement arrêté (208).

VITESSE DU SON. — INTERFÉRENCES.

27. Vitesse du son. — Si l'on dispose d'un espace suffisant, un aide se placera à une distance d'environ 200^{m} avec une planche

devant laquelle il fera osciller un pendule formé d'une règle noire (période $1^s, 5$). Il frappera un coup sur la planche à chaque passage du pendule dans la verticale. Pour déterminer la vitesse du son, l'observateur n'aura qu'à chercher à quelle distance il doit se placer pour que le bruit des chocs lui parvienne avec un retard d'une période (176).

28. Influence du déplacement de la source sur la hauteur d'un son. — Adapter un sifflet au bout d'un tube de caoutchouc ($l = 2^m$) et faire tourner le sifflet comme une fronde pendant qu'on envoie de l'air par le tube de caoutchouc. Un observateur placé assez loin dans le plan du mouvement entend des variations de hauteur du son, qui monte ou qui descend selon que le sifflet s'approche ou s'éloigne (118, 191).

29. Emploi des battements. — Se procurer deux diapasons à l'unisson montés sur leurs caisses de résonance et donnant au moins ut_3 , et de préférence ut_4 , et charger l'un d'eux d'un peu de cire molle, de manière qu'en les faisant vibrer ensemble on entende environ 4 battements par seconde.

Déplacer l'un des diapasons en le rapprochant et en l'éloignant rapidement de l'autre de toute la longueur du bras. Un observateur placé à quelque distance dans la direction du mouvement pourra constater que le nombre des battements augmente ou diminue suivant le sens du mouvement (186).

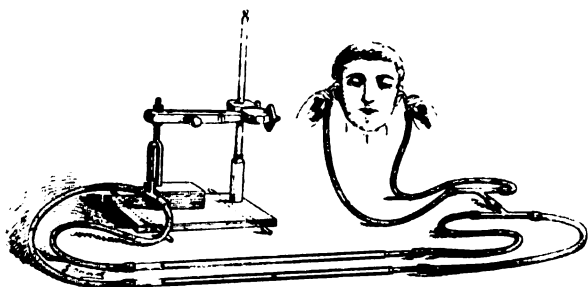
30. Interférences. Mesures de la vitesse du son. — *Montage.* — Le son est produit par un diapason qu'on fixe dans un support à pince, avec interposition de caoutchouc entre le diapason et le support et, aussi, entre le support et la table. Ce diapason doit donner une note aussi aiguë que possible, au moins le la_3 ; on l'excitera avec un marteau fait d'un bouchon de liège emmanché sur une lame flexible.

Se procurer deux couples de tubes de verre entrant l'un dans l'autre à frottement très doux ($l = 60^{\text{cm}}$. Diam. commun = $0^{\text{cm}}, 8$). Réunir *symétriquement* ces deux paires de tubes à deux tubes en T ($d = 0^{\text{cm}}, 8$; $3l = 15^{\text{cm}}$) au moyen de tubes de caoutchouc ($l = 60^{\text{cm}}$; $D = 0^{\text{cm}}, 8$). Ajuster ensuite sur l'un de ces tubes en T un tube de caoutchouc dans lequel on fixe un tube de verre courbé à angle aigu ($L = 5^{\text{cm}}$; $l = 2^{\text{cm}}$; $D = 0^{\text{cm}}, 8$) dont la petite branche s'accroche dans l'oreille. — Il y a quelque avantage à doubler

ce dernier tube et à se servir des deux oreilles comme l'indique la figure (186).

L'autre tube en T vient prendre le son entre les deux branches du diapason. On peut l'attacher contre un bloc de bois fixé à l'arcanson sur le support.

Expériences. — Enfoncer d'abord complètement les tubes mobiles, et disposer les deux chemins offerts au son aussi symé-



triquement que possible. On constatera que la superposition des deux systèmes d'ondes donne un son plus intense que chacun d'eux isolément.

Allonger ensuite l'un des circuits en faisant coulisser les tubes de verre jusqu'à ce que l'on obtienne la meilleure extinction possible. L'extinction est rarement complète en raison de la persistance possible de certains sons harmoniques au moment de l'extinction du son principal. Noter à ce moment la longueur de tube mobile qui a été sortie, puis rentrer complètement ce tube et répéter l'expérience sur l'autre circuit.

La somme des déplacements des tubes mobiles donne la longueur d'onde; on en déduira la vitesse du son dans les tubes de verre.

— On peut montrer ces expériences en remplaçant l'observation à l'oreille par l'observation à l'aide des flammes manométriques (V, 19). Mais, dans ce cas, il faut employer des vibrations énergiques. On pourra se servir d'un flacon tubulé ($V = 125\text{ cm}^3$) à moitié plein d'eau que l'on fera parler en soufflant sur le goulot, et l'on prendra le son dans la tubulure en y fixant un bouchon traversé par le tube en T qui se trouvait tout à l'heure entre les branches du diapason.

31. Interférences. — *Expériences qualitatives.* — Explorer

le champ sonore au voisinage d'un diapason, au moyen d'un tube de caoutchouc aboutissant à l'oreille ($d = 0^{\text{cm}}, 8$). On constatera l'extinction du son sur les deux surfaces d'interférences et le maximum dans le plan de symétrie.

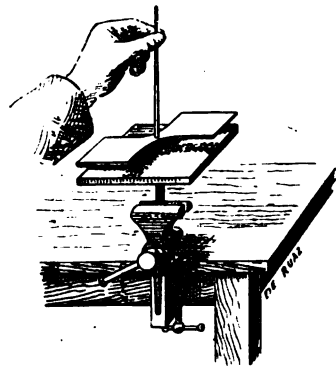
— On peut montrer le mécanisme de ces interférences en figurant le mouvement des branches du diapason par le mouvement des bras et en étudiant les mouvements de l'air avec des bougies (191).



— Écouter un diapason (sans caisse de résonance) et constater l'augmentation du son quand on atténue les vibrations émises par l'une des branches du diapason en l'entourant d'un tube métallique.

— Couper une plaque de laiton ($14^{\text{cm}} \times 14^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}}, 3$) et la faire reposer par son centre sur l'extrémité d'un manche de porte-plume ou d'un crayon. Faire vibrer la plaque en la frappant avec un objet métallique, la saupoudrer de sable et constater la formation des lignes nodales. On provoquera, en particulier, le partage de la plaque en quatre secteurs carrés en la touchant au milieu d'un côté pendant qu'on frappe près d'un angle.

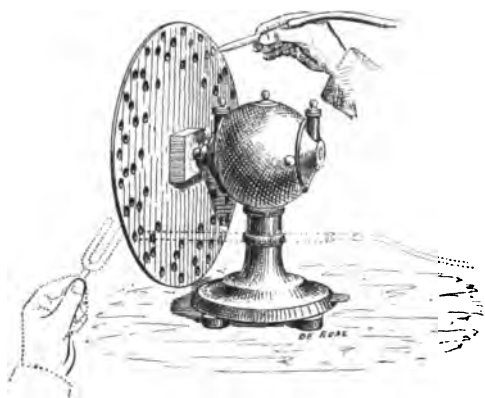
Découper, d'autre part, un carton ayant la forme de la figure formée par deux secteurs opposés, piquer un clou en son centre pour pouvoir le manœuvrer. Si l'on place cet écran de manière à masquer deux secteurs opposés, on constatera un renforcement énergétique du son.



— Explorer aussi le champ sonore au voisinage de la plaque au moyen de deux tubes de caoutchouc aboutissant par des chemins bien identiques, à un tube en T et de là, à l'oreille. On obtient un renforcement du son ou l'extinction par interférences, selon que l'on prend les ondes sonores sur deux secteurs opposés ou sur deux secteurs consécutifs (205).

HAUTEUR DES SONS ET STROBOSCOPIE.

32. Sirène. — *Montage.* — Sur un disque de carton blanc ($D = 35\text{cm}$), tracer des circonférences concentriques ayant des diamètres de 33cm , 30cm , 27cm et 24cm . Partager respectivement ces circonférences en 24, 20, 16 et 12 parties égales; puis percer



à l'emporte-pièce des trous ($d = 0\text{cm}, 5$) centrés sur les points de division. Clouer au milieu du disque un morceau de bois ($6\text{cm} \times 6\text{cm} \times 2\text{cm}$) et percer, exactement au centre, un trou qui sera ajusté à la lime de manière qu'on puisse y faire entrer à frottement dur l'axe d'un moteur électrique (moteur de ventilateur).

— Préparer aussi un tube de verre étiré ($D = 0\text{cm}, 8$; $d = 0\text{cm}, 3$) qu'on reliera à une soufflerie.

Expériences. — Mettre le moteur en mouvement et produire un son en soufflant sur l'une des couronnes de trous : ce son s'élève quand on augmente la vitesse. — Constater que l'on produit un deuxième son à l'unisson du premier quand on appuie le coin d'une carte contre la couronne de trous dans laquelle on souffle. — On cherchera la fréquence limite au-dessus de laquelle les chocs répétés se transforment en un son soutenu.

33. Sons de battements. — Ajuster un tube métallique fermé par un bouchon ($D = 1\text{cm}, 5$; $l = 20\text{cm}$), de manière à en faire un résonnateur pour un diapason aigu ($\text{sol}_1 = 768 \text{ V. D.}$); relier le fond de ce résonnateur à l'oreille par un tube de caoutchouc, puis placer l'entrée du résonnateur devant une couronne

de trous de la sirène marchant lentement. On n'entend d'abord que faiblement le son de la sirène.

Si l'on approche alors le diapason de l'entrée du résonnateur, de l'autre côté du disque, de manière que le son lui arrive en passant à travers les trous, on constatera que l'on n'entend pas seulement le son du diapason, mais que l'on entend encore un autre son, à l'unisson de celui que donne la sirène quand on souffle sur la couronne de trous étudiée (186).

34. Intervalles musicaux. — Montrer qu'à une vitesse quelconque, on obtient toujours l'accord parfait quand on souffle successivement ou simultanément dans les différentes couronnes de trous.

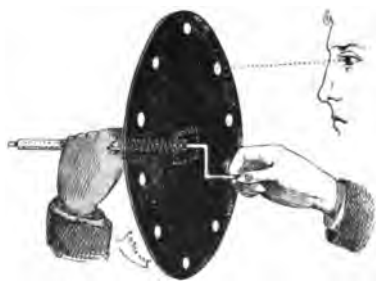
35. Stroboscopie. — Régler la vitesse du moteur de manière que le son de la sirène soit à l'unisson du son d'un fil d'acier tendu, ou bien d'un diapason ($ut_3 = 256$ V. D.) monté sur sa caisse de résonance. Ce réglage se fait d'abord au moyen d'un rhéostat et on l'achève en agissant sur l'axe avec la main. Regarder alors le diapason à travers les trous qui défilent : il devra paraître absolument immobile.

Laisser ensuite le moteur s'accélérer, et constater que le diapason semble vibrer lentement et synchroniquement avec les battements qui se font alors entendre. — On facilite les observations en fixant un bout de fil ($l = 2^{\text{cm}}$) sur le diapason au moyen d'une trace de cire molle.

36. Mesure de la hauteur d'un son avec la sirène. —

Montage. — Disposer une sirène comme dans les expériences précédentes, et noircir un secteur du disque perforé qui représente environ $\frac{1}{8}$ de sa surface.

Construire aussi un disque perforé auxiliaire ($D = 30^{\text{cm}}$) noirci sur toute sa surface et percé d'une couronne de 10 trous ($d = 1^{\text{cm}}$). Ce disque sera monté sur un axe métallique ($l = 35^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}},7$) que l'on ploiera en forme de manivelle en avant du disque ($2l = 12^{\text{cm}}$). La partie postérieure de l'axe tournera dans un tube métallique ($l = 20^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}},75$) que l'on tiendra dans la main gauche pendant que l'on tournera la manivelle de la main droite.

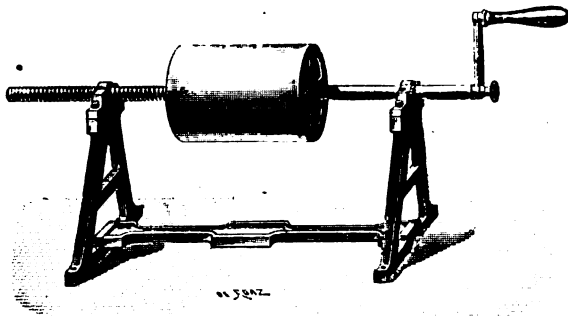


Expériences. — Ayant réglé la vitesse de la sirène de manière à obtenir l'unisson avec le son étudié on n'a plus qu'à compter les tours du moteur.

Si l'on ne dispose pas d'un compteur de tours, on pourra se servir du disque perforé à manivelle. Un aide fera tourner ce disque à la main et réglera la vitesse de rotation de manière qu'en regardant à travers les trous, le disque blanc et noir de la sirène lui paraisse immobile. Maintenant cette vitesse bien constante, l'aide n'aura qu'à compter combien il fait alors de tours de manivelle à la minute, et l'on en déduira le nombre de vibrations du son étudié.

37. Compter les vibrations d'un diapason : méthode graphique. — *Montage.* — A défaut d'un cylindre enregistreur à mouvement hélicoïdal (1) sur lequel on enregistrerait les vibrations du diapason en même temps que les signaux envoyés par une horloge électrique, on pourra employer les dispositifs suivants :

Clouer sur la table deux règles d'écolier de manière à faire une



glissière dans laquelle pourra se déplacer librement une plaque de verre enfumée ($35^{\text{cm}} \times 10^{\text{cm}}$); un morceau de carton collé à la cire au bout de la plaque de verre permettra de la manœuvrer. Couper une planche ($30^{\text{cm}}; 22^{\text{cm}}; 1^{\text{cm}}, 8$) et visser le diapason étudié ($ut_3; 2l = 40^{\text{cm}}$) vers le milieu du petit côté et parallèlement aux faces de la planche.

Préparer d'autre part un ressort d'acier ($50^{\text{cm}}; 1^{\text{cm}}, 5; 0^{\text{cm}}, 15$),

(1) On peut construire facilement un cylindre enregistreur avec une boîte cylindrique en carton (comme celles où l'on conserve les manchons) embrochée sur une tige d'acier bien droite (77).

détremper une extrémité, y percer deux trous et visser le ressort contre une plaque de chêne (10^{cm}; 5^{cm}; 2^{cm}) qui sera elle-même vissée sur la même planche que le diapason. Fixer ensuite à la cire, à l'extrémité libre du ressort, une lamelle de bois (3^{cm}; 2^{cm}; 0^{cm},3) qui viendra se projeter à 2^{cm} de l'extrémité du diapason.



On prendra comme styles des *soies* empruntées à un balai ou à une brosse, on les taillera en pointe à coups de ciseaux et on les fixera avec de la cire molle sur l'extrémité du diapason et sur la lamelle de bois qui prolonge le ressort. — On aurait un tracé plus fin en prenant un filament de barbe de plume comme pointe du style.

Expériences. — Enfumer la plaque de verre en la passant dans la pointe d'une flamme de bougie, la mettre dans la glissière, poser à plat sur cette glissière la planche qui porte le ressort et le diapason, et régler les styles de manière qu'ils appuient très légèrement sur le verre.

Soulever la planche et faire fortement vibrer le diapason en le frappant, par exemple, avec un manche d'outil. Replacer rapidement la planche sur la glissière, faire immédiatement osciller le ressort de 1^{cm} ou 2^{cm} autour de sa position d'équilibre, et, tout aussitôt, faire glisser la plaque enfumée.

Le graphique ayant été fixé en versant sur la plaque enfumée une dissolution très étendue de gomme laque dans l'alcool, on lira sur cette plaque le rapport des nombres de vibrations que le diapason et le ressort ont effectuées pendant un même temps. — Quand les vibrations du diapason sont assez intenses, elles se transmettent au ressort par l'intermédiaire de la planche qui sert de support; et le style de ce ressort enregistre d'un seul trait les deux systèmes de vibrations superposées. Pour avoir le rapport des périodes, il n'y a alors qu'à compter le nombre des vibrations rapides contenues dans une vibration lente.

— Pour rapporter les mesures à la seconde, on comptera enfin, sans les enregistrer, le nombre des vibrations que le ressort effectue pendant une demi-minute (186, 191).

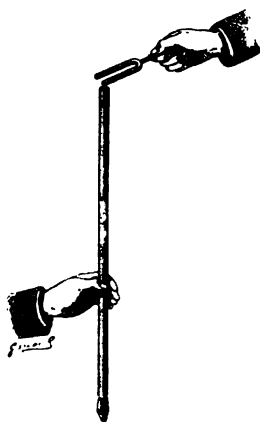
TUYAUX SONORES. — RÉSONNATEURS.

38. Tuyaux ouverts. — *Montage.* — Mesurer la longueur intérieure de la caisse de résonance d'un diapason et couper un tube métallique de longueur double ($d = 2^{\text{cm}}$; $l = 60^{\text{cm}}$ pour ut_3). A l'entrée du tube métallique, ajuster, comme un bouchon, l'embouchure d'un flageolet (jouet) dans laquelle on soufflera soit à la bouche, soit avec une soufflerie. Si l'on emploie le soufflet à pédale de la table d'émailleur (page 32), on interposera un robinet pour régler le débit de l'air.

Sons harmoniques. — Souffler d'abord très doucement, puis de plus en plus fort, et constater que l'on obtient la succession des harmoniques ut_3 ; ut_4 ; sol_4 ; ut_5 ; mi_5 ; sol_5 ; la_5 *demi-dièse* (7^{e} harmonique dissonant); ut_6 ; etc.

On fera parler de la même manière un autre tube de longueur presque égale; et l'on observera que le tuyau le plus court donne des sons un peu plus aigus. Mais on obtient aisément des battements, puis l'unisson exact, en allongeant ce tuyau de la longueur voulue au moyen d'un petit tube mobile fait d'une feuille de carton mince roulée autour du tube métallique.

Résonance. — Si l'on dispose de plusieurs diapasons donnant les diverses notes que l'on vient d'obtenir, on constatera que l'on



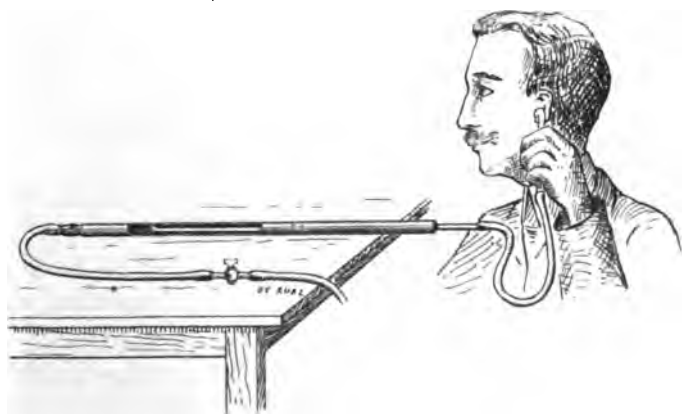
peut faire fonctionner le tuyau sonore comme résonateur en l'approchant de l'un quelconque de ces diapasons que l'on aura mis en vibration.

Nœuds. — Préparer un bouchon fermant presque exactement le tuyau et emmancher ce bouchon au bout d'une tige de verre ou de métal ($d = 0^{\text{cm}},5$; $l = 70^{\text{cm}}$). Souffler dans le tuyau de manière à lui faire donner une note harmonique un peu élevée et constater que l'on peut obtenir le même son quand le piston est enfoncé de quantités convenables dans le tuyau.

Les positions du piston permettent de définir les nœuds de vibrations du tuyau. On mesurera leurs distances, on notera, en particulier, les anomalies qui se présentent aux extrémités du tuyau ; et, de la valeur de ces internœuds, on déduira la vitesse du son dans le tuyau.

Ventres. — Préparer un tube de verre ($d = 0^{\text{cm}},5$; $l = 60^{\text{cm}}$) courbé à angle droit à 1^{cm} d'une extrémité, et relier l'autre extrémité à l'oreille par un tube de caoutchouc ($d = 0^{\text{cm}},5$; $l = 100^{\text{cm}}$). Faire rendre un son harmonique au tuyau, explorer ce tuyau avec la sonde acoustique et constater l'extinction du son quand l'ouverture de la sonde passe en certains points ; c'est là que se trouvent les *ventres*. — On s'assurera qu'il deviendrait à peu près impossible de déceler l'existence des ventres si l'on explorait le tuyau avec une sonde droite au lieu d'une sonde recourbée à angle droit.

Si le son est assez bas (ut_3), on peut remplacer l'observation avec l'oreille par l'observation avec une flamme manométrique (V, 19).



Les ventres ainsi trouvés sont-ils équidistants ? Y a-t-il des ventres aux extrémités ? Comment les ventres se placent-ils par rapport aux nœuds ?

— On peut montrer qu'il n'y a pas de variations de pressions aux ventres en faisant un trou dans la paroi du tuyau, à l'endroit où se trouvait un ventre : le son ne doit pas changer. Cette der-



nière expérience se fait aisément avec une flûte quelconque en lui faisant rendre les sons des octaves supérieures (186).

Influence de la température et de la densité du gaz. — Chauffer le tuyau en son milieu sur un bec Bunsen pendant qu'on le fait parler. Si le tuyau se trouvait d'abord accordé avec un diapason, il cesse de l'être et des battements se produisent dès que l'on commence à chauffer; la hauteur du son s'élève ensuite progressivement.

— Faire parler le tuyau avec un courant de gaz d'éclairage. L'élévation de la hauteur du son obtenu est-elle d'accord avec ce qu'indique la formule de la vitesse du son?

Influence de la nature des parois et du diamètre des tubes. — On disposera, comme nous l'avons dit au début, des tubes de verre et des tubes de métal de même longueur et de diamètres différents et l'on reconnaîtra que les sons qu'ils donnent sont extrêmement voisins sinon identiques (202).

39. Flammes chantantes. — On peut faire rendre à un tuyau un son excessivement intense en l'excitant au moyen d'une flamme. Le tuyau est fermé à un bout par une toile métallique (10 mailles au centimètre); on envoie sur cette toile un jet de gaz d'éclairage au moyen d'un tube effilé ($d = 0^{\text{cm}}, 1$) placé à quelques centimètres en dessous et l'on allume le gaz *dans le tube*.

Le débit de gaz qui convient le mieux se trouve facilement en retirant le tube et en allumant la flamme au-dessus de la toile métallique. Il faut que la flamme brûle bleu en crépitant, tandis que le cône verdâtre du centre est tout à fait déprimé.

La hauteur des sons obtenus de cette manière n'est pas parfaitement définie; aussi deux tuyaux égaux, actionnés en même temps par ce procédé, produisent-ils, en général, des *sons de battements* très énergiques (78, 156).

40. Tuyaux fermés. — Couper un tube de métal ($d = 2^{\text{cm}}, l = 30^{\text{cm}}$), le fermer à une extrémité par un bouchon de liège, et

ajuster l'embouchure de flageolet à l'autre extrémité. Faire résonner le tuyau en soufflant de plus en plus fort et constater qu'il donne successivement les notes *ut*, *sol*, *mi*, . . . S'assurer que le son fondamental monte d'une octave quand on débouche le tuyau.

41. Résonance des tuyaux fermés. — Déboucher le tuyau et en faire un tuyau fermé de longueur variable en l'enfonçant plus ou moins dans un seau d'eau.

On observera d'abord que le son produit en soufflant par l'embouchure s'élève à mesure que l'on raccourcit le tuyau, et l'on notera les longueurs pour lesquelles le tuyau est à l'unisson des différents diapasons dont on dispose.

Plaçant ensuite le tuyau dans la position qui donne l'unisson avec l'un des diapasons, on retirera l'embouchure et l'on verra que le tuyau peut servir de résonnateur pour renforcer le son du diapason.

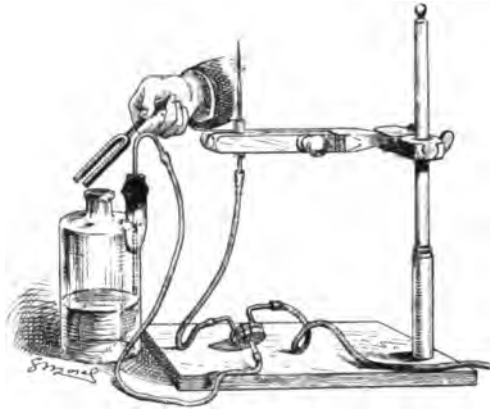
— Ayant choisi le diapason le plus aigu, on reprendra l'expérience en sens inverse, en cherchant pour quelles longueurs de tuyau la résonance a lieu. On constatera que la résonance se produit pour plusieurs longueurs régulièrement croissantes. Y a-t-il une anomalie pour la première résonance? Peut-on déduire de ces mesures la valeur de la vitesse du son?

— On peut aussi répéter ces expériences de résonance au moyen de deux éprouvettes à pied, tubulées en bas, reliées par un tube de caoutchouc et à moitié pleines d'eau. En opérant avec cet appareil d'abord plein d'air, puis plein d'anhydride carbonique, on pourra comparer les vitesses du son dans ces deux gaz (41, 62, 111).

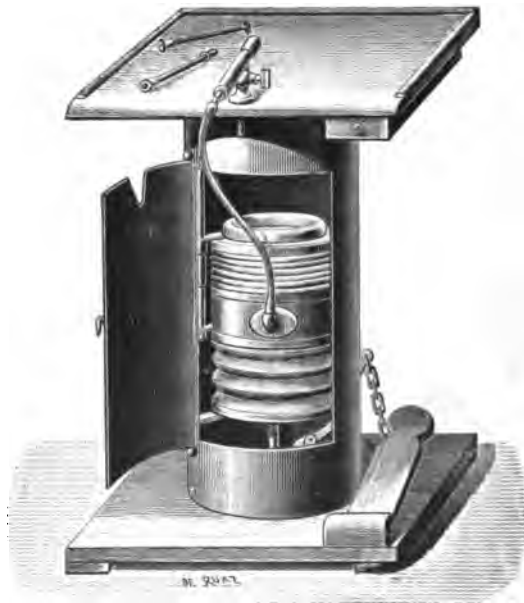
42. Résonance d'une cavité quelconque. — On peut faire parler des cavités quelconques, flacons, tubes ou ballons, en soufflant sur leur orifice avec un tube de caoutchouc, relié à un soufflet à pédale (page 32). On aplatit avec le doigt l'ouverture du tube de caoutchouc sur le bord de la cavité, de manière que le jet d'air soit dirigé vers le bord opposé (86).

En employant par exemple un flacon tubulé ($V = \frac{1}{2}$ litre) contenant une quantité d'eau convenable, on pourra obtenir le son *ut*. On reconnaîtra alors que, si l'on approche du goulot du flacon un diapason *ut*, en vibration, le son se trouve renforcé. — Cette résonance pourra être montrée avec une flamme manométrique (V, 19) qui sera mise en relation avec un tube de

verre ($d = 0^{\text{cm}}$) fixé dans un bouchon fermant la tubulure et pénétrant presque jusqu'à la surface de l'eau.

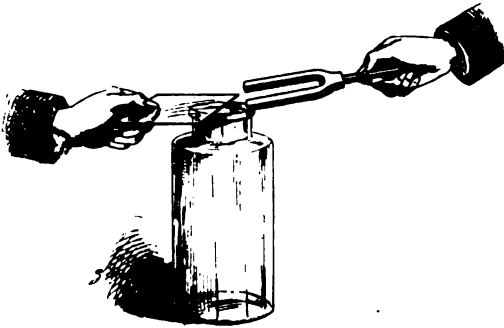


— On constitue encore un résonateur réglable avec un bocal



dont on ferme plus ou moins l'ouverture avec une plaque de verre.

C'est ainsi qu'un bocal de $1^l,5$ ne renforce énergiquement le son ut_3 que si l'ouverture est à moitié fermée (191).



43. Cavités semblables. — On fera parler deux sphères creuses en laiton ($D = 8^{\text{cm}}$ et 4^{cm}) (boules pour rampes d'escalier), et l'on déterminera la hauteur des sons obtenus en cherchant sur le sonomètre les longueurs de corde correspondantes (V, 45). Mesurant ensuite le rayon moyen des cavités par un jaugeage à l'eau, on s'assurera que la fréquence des vibrations est en raison inverse des dimensions homologues.

44. Ondes stationnaires dans l'air et transport des poussières. — *Montage.* — Se procurer un tube de verre ($l = 100^{\text{cm}}$, $D = 3^{\text{cm}}$, $e = 0^{\text{cm}}, 2$) et un tube de laiton ($l = 50^{\text{cm}}$, $D = 1^{\text{cm}}$). Boucher l'une des extrémités du tube de laiton et la munir d'un petit piston de liège ($e = 0^{\text{cm}}, 5$) entrant librement dans le tube de verre, puis fixer le tube de laiton par son milieu



dans un bouchon qui ferme le tube de verre. Mettre dans le tube de verre une poudre très légère, telle que de la limaille de liège tamisée, de la poudre de lycopode ou de la silice précipitée, et fermer ce tube par un deuxième bouchon.

A., II.

Expériences. — Faire vibrer longitudinalement la tige de métal au moyen d'un morceau de drap saupoudré de résine pulvérisée, pendant que l'on tourne un peu le tube autour de son axe. Les poussières se rassemblent en dessinant les ondes stationnaires. On déplacera légèrement, s'il le faut, la tige vibrante pour chercher la position du piston la plus favorable. On mesurera alors les longueurs des internœuds et l'on calculera le rapport des vitesses du son dans l'air et dans le laiton. — Comment les ondes stationnaires sont-elles modifiées quand on opère avec un tuyau ouvert?

— Ajuster ensuite des tubes de verre ($D = 0^{\text{cm}}, 7$) dans les bouchons fermant le tube à poussières; remplir ce tube de gaz d'éclairage ou de gaz carbonique. On déterminera le changement de longueur d'onde et l'on en déduira la densité du gaz étudié.

— Les expériences se font aussi très bien en actionnant le tube à poussière avec une embouchure de flageolet. On peut ainsi faire rendre successivement au tuyau tous les sons harmoniques et en étudier les nœuds et les ventres (191). Il faut éviter de souffler à la bouche pour ne pas produire dans le tube une condensation d'humidité qui empêcherait le transport des poussières.

CORDES VIBRANTES.

45. Sonomètre. — *Montage.* — Faire une caisse en bois sans couvercle ($100^{\text{cm}} \times 20^{\text{cm}} \times 10^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}$) et la suspendre au moyen de deux clous à crochet fixés dans le mur et de deux pitons fixés dans la caisse. On clouera un tasseau derrière le fond de la caisse et à 20^{cm} du haut ($20^{\text{cm}} \times 2^{\text{cm}} \times 2^{\text{cm}}$), de manière que la caisse penche légèrement en arrière.

Clouer deux mètres rubans sur la tranche des longs côtés de l'ouverture et fixer extérieurement deux ou trois fortes vis ($d = 0^{\text{cm}}, 7$) sur le petit côté supérieur de la caisse et près de la base. Préparer d'autre part des S métalliques ($d = 0^{\text{cm}}, 4$; $2D = 3^{\text{cm}}$) et percer dans chacune d'elles un trou pour le passage des fils (II, 38).

Loi des longueurs. — Suspendre l'appareil contre le mur, et mettre en place une corde à piano (fil d'acier, $d = 0^{\text{cm}}, 04$) à laquelle on suspendra un poids de 10^{kg} . Glisser un tube de verre ($d = 0^{\text{cm}}, 7$; $l = 25^{\text{cm}}$) entre les bords de la caisse et la corde, de

manière à pouvoir faire varier la longueur de corde utilisée. Faire vibrer la corde à la main en déplaçant progressivement la baguette de verre qui sert de chevalet, et chercher les longueurs de corde qui correspondent aux différentes notes de la gamme. Avec quelle précision la loi des longueurs se trouve-t-elle vérifiée?

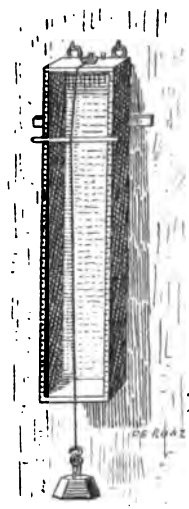
Loi des poids tenseurs. Stroboscopie. — Remplacer la tension de 10^{kg} par une tension de $2^{\text{kg}},5$ et constater que l'on obtient exactement l'octave grave du son précédent.

La vérification se fait avec une extrême précision par les procédés stroboscopiques, en regardant, par exemple, la corde vibrante à travers les trous de la sirène (V, 32). La manipulation pourra être conduite ainsi : on disposera deux cordes pareilles dont on réglera d'abord l'unisson, en modifiant l'un des poids tenseurs, s'il est nécessaire, et l'on reconnaîtra ce synchronisme par l'observation stroboscopique. On réduira ensuite l'autre poids tenseur au quart de sa valeur. L'observation stroboscopique faite au synchronisme de la plus grande fréquence devra alors montrer la corde correspondante immobile dans une position déterminée tandis que l'autre corde paraîtra immobile à la fois dans deux positions. L'observation stroboscopique faite au synchronisme de la fréquence la plus faible montrerait, au contraire, les deux cordes immobiles dans une seule position.

Ces observations seront facilitées si l'on a soin de passer du papier émeri sur les cordes pour qu'elles soient très brillantes.

Loi des masses. — On fixera sur le sonomètre des cordes de différentes natures telles que des fils d'acier ($d = 0^{\text{cm}},04$ et $d = 0^{\text{cm}},07$) des fils de laiton ou de cuivre écroui ($d = 0^{\text{cm}},05$), de la ficelle fine ou une corde de violon (chanterelle), et on les tendra sur le sonomètre en réglant les poids tenseurs de manière à mettre ces cordes à l'unisson.

On marquera alors sur ces cordes une même longueur (80^{cm}) et l'on déterminera les poids de ces portions correspondantes. Les poids ainsi obtenus sont-ils proportionnels aux poids tenseurs qui ont donné l'unisson ?

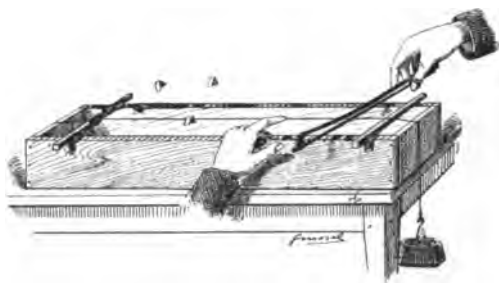


46. Hauteur absolue d'un son. — Reprenant la corde d'acier ($d = 0^{\text{cm}}, 04$) on réglera d'abord le poids tenseur de manière que le son de la corde soit un peu plus grave que le son d'un diapason étalon, puis on fera glisser le tube de verre formant chevalet, de manière à obtenir d'abord des battements, puis l'unisson exact. La longueur actuelle de la corde est-elle égale à celle que l'on calculerait en admettant la formule classique?

47. Sons harmoniques. — Placer le sonomètre horizontalement sur la table et soulever la corde vers ses deux extrémités, en glissant en dessous des règles d'écolier, de manière à pouvoir attaquer cette corde avec un archet de contrebasse.

Faire donner à la corde les différents sons harmoniques en la touchant avec le doigt à la moitié, au tiers, au quart, etc., de sa longueur, pendant qu'on l'attaque avec l'archet au milieu du plus petit segment. On reconnaîtra que ce son harmonique a la même hauteur que celui que l'on obtiendrait en empêchant le grand segment de vibrer; que ce son persiste seul quand on abandonne ensuite la corde à elle-même; mais que le son harmonique peut aussi se superposer au son fondamental si l'on n'a pas complètement immobilisé la corde au premier nœud.

— Pour montrer le partage de la corde en plusieurs concamérations, on place de petits cavaliers de papier ($2^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}}, 5$) de



centimètre en centimètre au voisinage d'un nœud. Quand on fait vibrer la corde, tous ces cavaliers sont projetés, à l'exception de celui qui se trouve presque exactement au nœud.

48. Vibrations forcées et résonance. — *Montage.* — Retirer le timbre et le battant d'une sonnerie électrique, fixer cette sonnerie sur une planchette ($20^{\text{cm}} \times 20^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}, 8$) munie de quatre pitons placés de manière qu'on puisse l'accrocher dans deux direc-

tions perpendiculaires, et planter dans le mur deux clous à crochets à 1^m,50 du sol pour y suspendre la sonnerie. Attacher ensuite à la tige vibrante un cordonnet de soie bien souple ($l = 120^{\text{cm}}$) et accrocher la sonnerie de manière qu'elle imprime à cette corde des vibrations transversales (17, 94, 191, 240) (1).

Expériences. — Suspendre au fil une masse de 100^g et faire fonctionner la sonnerie. La corde entre en *vibrations forcées* et prend l'aspect d'un fuseau étroit, avec un nœud à l'extrémité inférieure.

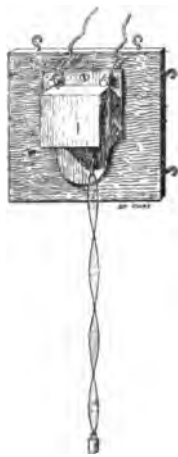
Si l'on diminue progressivement le poids tenseur jusqu'à 1^g, on voit d'abord les vibrations augmenter d'amplitude; puis un ventre se forme à l'extrémité supérieure et descend progressivement vers le milieu de la corde. A ce moment, la résonance se produit pour les vibrations de la corde tout entière avec des nœuds aux deux bouts.

— La corde se divise ensuite en deux segments, puis en un plus grand nombre, et l'on peut constater l'égalité de longueur des différents segments. Ils sont en résonance avec les vibrations de la sonnerie, à l'exception du segment supérieur qui est généralement en vibrations forcées.

On vérifiera en outre que les longueurs des internœuds sont proportionnelles aux racines carrées des poids tenseurs.

— Ayant mesuré l'internœud sous faible charge (1^g) on changera l'orientation de la sonnerie et on la suspendra de manière qu'elle exerce sur le fil des efforts longitudinaux. On constatera alors que les nœuds sont deux fois plus éloignés, c'est-à-dire que les vibrations transversales sont deux fois plus lentes que dans l'autre position.

— Revenant à la première position de la sonnerie, on pourra changer le cordonnet de soie contre un autre de grosseur différente et vérifier qu'à charge égale, la longueur des internœuds



(1) En faisant vibrer le fil au moyen du trembleur d'une bobine de Ruhmkorff, on pourra faire une étude stroboscopique du fil en l'éclairant avec la lumière d'un tube de Geissler actionné par la bobine : on produira les différences de phase en agissant sur la vis de réglage du trembleur (77, 149).

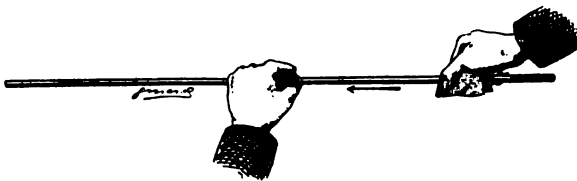
est inversement proportionnelle à la racine carrée du poids du mètre de fil.

VIBRATIONS LONGITUDINALES DES FILS ET DES VERGES.

49. Vibrations des fils. — Tendre deux fils d'acier de diamètres différents ($d = 0^{\text{cm}}, 04$ et $0^{\text{cm}}, 07$) sur la caisse du sonomètre (V, 45) placée horizontalement et les faire vibrer longitudinalement en les frottant avec un morceau de drap recouvert de colophane en poudre. Malgré la différence de diamètre, la hauteur du son doit être la même pour les deux fils et indépendante de leur tension.

On déterminera la hauteur absolue du son en faisant vibrer transversalement la corde la plus fine et en réglant sa longueur de manière à obtenir l'unisson ou l'octave grave des vibrations longitudinales de l'autre corde. On déduira de ces mesures la vitesse du son dans l'acier (174).

Vibrations des verges. — Couper ensuite une tige d'acier ($d = 0^{\text{cm}}, 5$) d'une longueur égale à celle des fils (100^{cm}), la tenir par le milieu entre deux doigts et la faire vibrer longitudinalement; elle doit donner à peu près la même note que le fil d'acier. — Couper aussi des tiges semblables, mais dont les longueurs

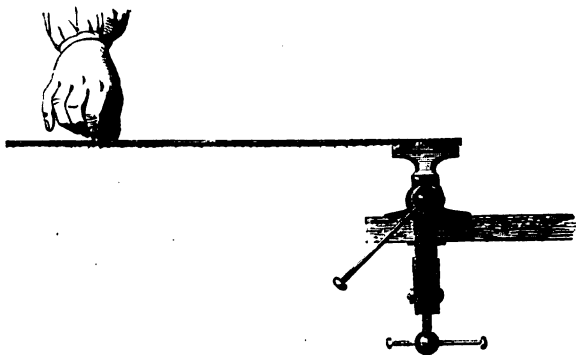


soient les $\frac{3}{4}$, les $\frac{5}{8}$ et la moitié de la longueur primitive et constater que ces tiges donnent l'accord parfait avec la première.

— Faire vibrer longitudinalement une tige ou un tube de laiton. Il donnera un son plus grave qu'une verge d'acier de même longueur; on estimera à l'oreille l'intervalle musical qui sépare les deux sons, et l'on en déduira le rapport des vitesses de propagation du son dans les deux métaux. — On pourra aussi déterminer la vitesse du son dans une tige de métal en étudiant les ondes stationnaires que ses vibrations peuvent produire dans un tube plein d'air (V, 44).

VIBRATIONS TRANSVERSALES DES VERGES. — DIAPASON.

50. Influence des dimensions sur la période. — Fixer horizontalement une lame d'acier (60^{cm} ; 1^{cm} , 2 ; 0^{cm} , 07) en la serrant dans un étau et étudier les variations de la période de ses



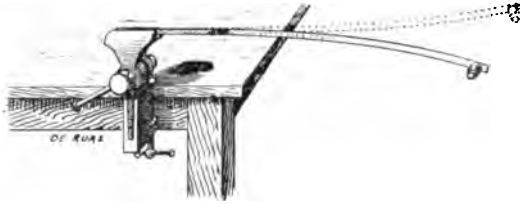
oscillations en fonction de sa longueur. La période est-elle proportionnelle au carré de la longueur? — Mesurer ensuite la période des oscillations d'une lame environ deux fois plus épaisse. La période est-elle inversement proportionnelle à l'épaisseur? — La période dépend-elle aussi de la largeur de la lame?

Admettant l'exactitude de ces lois on calculera la note que devrait donner un diapason d'après la mesure de ses dimensions. Y a-t-il une concordance satisfaisante? — On pourra s'assurer que ces lois sont vérifiées par les lames d'un piano à lames de verre (jouet), ou bien par celles d'un *claquebois*. On pourra construire cet appareil soi-même en découpant quatre planchettes de bois dur, épaisses de 9^{cm} , larges de 4^{cm} et longues respectivement de 14^{cm} , 1 , 15^{cm} , 8 , 17^{cm} , 2 et 20^{cm} qui devront donner l'accord parfait.

51. Influence d'une surcharge. — Faire osciller la lame d'acier en lui faisant porter une surcharge constituée par un *poids* en laiton (50^{g}). On placera cette surcharge sur le côté de la lame, à différentes distances de l'extrémité, en le faisant tenir avec un peu de cire molle (*fig. page 40*). Peut-on représenter les variations du carré de la période par une fonction parabolique du déplacement de la surcharge?

— Placer de même des surcharges de quelques grammes à l'extré-

mité de chacune des branches d'un diapason et faire vibrer ce diapason en même temps qu'un autre qui donnait la même note. Le



nombre des battements est-il proportionnel à la masse totale des deux surcharges? — Déplacer ensuite les surcharges, le long du diapason; étudier les variations du nombre des battements en fonction des déplacements de la surcharge et construire la courbe représentative de ces variations. On cherchera, en particulier, à déterminer de cette manière la position des nœuds qui se trouvent vers le bas des deux branches du diapason.

52. Influence de la température. — Si l'on ne dispose pas d'une étuve, on peut chauffer un diapason en le plaçant pendant quelques instants dans de l'eau bouillante. On l'essuie ensuite rapidement et l'on détermine tout aussitôt le nombre des battements qu'il donne avec un autre diapason qui se trouvait primitivement à l'unisson avec le premier. On pourra suivre le refroidissement du diapason en continuant à observer les battements qui s'espaceront de plus en plus à mesure que la température s'abaissera (186).

TIMBRE DES SONS.

53. Analyse et synthèse d'un son avec le piano. — Soulever le couvercle du piano, soulever les étouffoirs et chanter, près des cordes, une voyelle déterminée sur une note soutenue et *juste* (ut_3). Après que l'on aura cessé de chanter, les cordes du piano continueront le son de la voix *avec son timbre*. Il sera, du reste, facile de reconnaître quelles sont les cordes qui auront été mises en vibration (191, 210).

54. Complexité des sons du piano. — Frapper fortement sur une note (ut_3) tandis qu'on soulève l'étouffoir d'une note harmonique (ut_1 , sol_1 , etc.). Cette note harmonique continue à se faire entendre quand on éteint le son de la note principale et l'on peut

s'assurer qu'aucune résonance ne se produit pour les notes voisines. On constatera de cette manière la présence des différentes notes harmoniques à l'exception de celle dont un nœud correspondrait au point où le marteau vient frapper la corde.

55. Analyse des sons avec les diapasons. — On reconnaîtra de même l'existence des harmoniques dans la voix humaine en chantant une même note successivement devant l'ouverture des caisses de résonance d'une série de diapasons donnant le son fondamental ou l'un des sons harmoniques de la note que l'on chante : le diapason continuera à vibrer quand on cessera de chanter.

Ces phénomènes de résonance avec le diapason demandent une très grande justesse dans l'émission. Il est, en effet, aisé de constater que l'on peut faire vibrer un diapason par résonance au moyen d'un autre diapason *exactement à l'unisson*; mais cette résonance devient, au contraire, impossible si le second diapason donne des battements avec le premier.

56. Emploi des flammes manométriques. — Chanter les différentes voyelles sur une note un peu basse (ut_3) en ouvrant peu la bouche, et étudier la forme de la vibration en explorant la bouche avec un tube de caoutchouc ($d = 0^{\text{cm}}, 8$) communiquant avec la capsule d'une flamme manométrique (**V, 19**).

57. Phonographe. Voyelles. — Si l'on dispose d'un phonographe, on enregistrera la parole chantée, et on la reproduira à différentes vitesses. En augmentant la vitesse, on constatera non seulement que le son s'élève, mais encore que les sons changent de timbre et que les voyelles, notamment, sont altérées.



CHAPITRE VI.

OPTIQUE.

MATÉRIEL.

1. Lentilles, prismes. — La plupart des expériences d'optique peuvent être faites avec une précision très largement suffisante en se servant des verres pour binocles ou pour oculaires, concaves, convexes, cylindriques et prismatiques. On les trouve dans le commerce non montés ($D = 4^{\text{cm}}, 5$) et l'on peut s'en procurer des séries complètes pour un prix très minime. En argentant une de leurs surfaces, ces verres fournissent de bons miroirs sphériques (47).

2. Projections. — Lampe à acétylène. — A défaut de l'arc électrique ou des sources de lumière très intenses qui nécessitent l'emploi de l'oxygène, on peut employer le plus souvent, pour les expériences de projections, soit un bec à incandescence par le gaz, soit l'éclairage à l'acétylène.



On construit aisément une lampe à acétylène portative avec un simple flacon col droit ($V = 375^{\text{cm}^3}$) dans lequel on met un peu de carbure grossièrement concassé. On y verse de l'alcool à brûler, de manière à couvrir le carbure, et l'on ajoute à peu près autant d'eau, en s'arrêtant à la quantité juste convenable pour donner au dégagement gazeux la vitesse que l'on désire. — Le flacon est fermé par un bouchon de caoutchouc à travers lequel passe un tube de verre ($d = 0^{\text{cm}}, 7$) dont on a cassé l'extrémité inférieure avec des pinces plates, de manière à former un biseau très allongé permettant aux gouttelettes liquides entraînées de retomber dans le flacon.

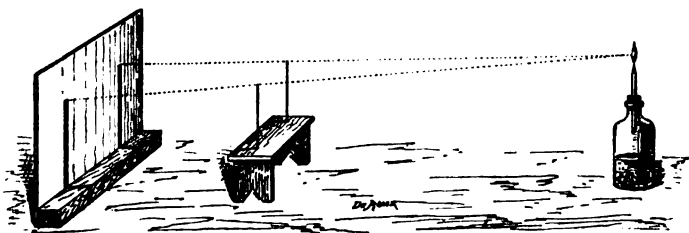
Pour obtenir une flamme linéaire ($l = 4^{\text{cm}}$), qui peut être placée verticalement ou horizontalement, il suffit de brûler l'acétylène à l'extrémité d'un tube de verre étiré en une pointe très fine ($D = 0^{\text{cm}},7$; $d = 0^{\text{cm}},03$). En remplaçant le tube effilé par un bec en stéatite à trous conjugués et en augmentant le débit du gaz, on obtient une flamme *papillon* qui fournit une lumière intense (77).

PROPAGATION RECTILIGNE DE LA LUMIÈRE.

3. Sources ponctuelles. — Beaucoup de phénomènes peuvent être montrés en projetant sur un écran une *ombre* des objets fournie par une source quasi ponctuelle, telle que l'arc électrique ou la lumière oxydrique. Pour avoir des ombres d'une netteté extrême, on pourra s'éclairer avec une lampe électrique à gros filament, par exemple avec une lampe Nernst dont on diaphragmera même la tige incandescente par une fente ($d = 0^{\text{cm}},2$) perpendiculaire à la ligne lumineuse.

Au lieu de diaphragmer la source, il revient au même de s'éclairer avec la petite image de la source que fournit une lentille à court foyer (verre d'oculaire) et, au besoin, de diaphragmer cette image (36, 63, 66).

4. Ombres. — Projeter l'ombre d'un objet quelconque sur un écran de carton blanc en plaçant l'objet assez près de l'écran et la

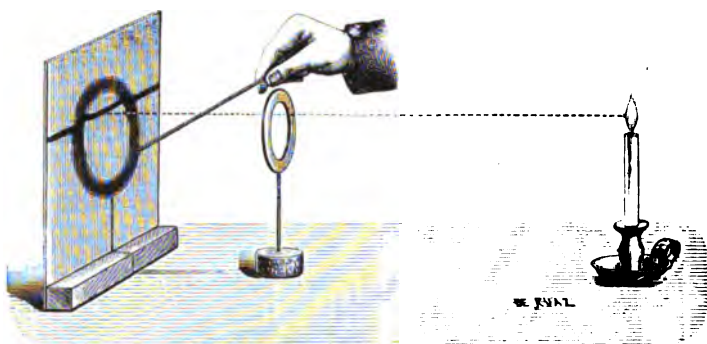


source ponctuelle à une distance de plusieurs mètres et dessiner au crayon le contour de l'ombre: on pourra suivre cette ombre avec précision.

— Fixer deux aiguilles à tricoter sur un petit banc, à environ 10^{cm} l'une de l'autre et à 50^{cm} de l'écran; mettre la source à une

distance à peu près double et s'assurer que le rapport de l'écartement des ombres à l'écartement des objets est bien égal au rapport des distances à la source de lumière.

5. Pénombres. — Placer un morceau de carton découpé en forme d'anneau ($D = 7^{\text{cm}}$; $d = 5^{\text{cm}}$) à 25^{cm} d'un écran blanc, en le tenant par une aiguille à tricoter piquée dans un bouchon de



liège plat et projeter son ombre au moyen d'une bougie placée deux fois plus loin.

Plaçant ensuite une aiguille à tricoter parallèlement à l'écran et à environ 15^{cm} de cet écran, on notera les déformations et le dédoublement de son ombre dans la pénombre de l'anneau; et l'on construira un diagramme de la marche de la lumière pour rendre compte de ces apparences (132).

6. Images dans la chambre noire. — Construire une caisse ($25^{\text{cm}} \times 20^{\text{cm}} \times 15^{\text{cm}}$) dont l'une des faces sera formée par un verre dépoli qu'on fera tenir avec des pointes; pratiquer une ouverture ($d = 4^{\text{cm}}$) au milieu de la face opposée et fermer cette ouverture par une feuille de papier d'étain qu'on perce d'un trou d'épingle.

Diriger l'ouverture vers la fenêtre, regarder le verre dépoli en se mettant à l'abri de la lumière étrangère au moyen d'un voile noir, et dessiner sur ce verre l'image renversée des objets extérieurs. — L'expérience est très brillante quand on prend l'image du ciel, soit directement, soit par réflexion dans un miroir plan placé devant la chambre noire.

Ce dernier dispositif se prête particulièrement bien à la pro-

jection. Faisant l'obscurité dans la salle, on placera extérieurement un miroir porte-lumière, on mettra dans le trou du volet un diaphragme opaque percé d'une ouverture un peu large ($d = 1^{\text{cm}}$), et l'image *droite* des objets extérieurs viendra se peindre sur l'écran de projection placé à quelques mètres de distance (87).

— L'expérience peut être faite en sens inverse, en projetant l'image de la source de lumière (arc électrique) placée dans la lanterne de projection dont on ferme l'ouverture par une feuille de papier noir. Si l'on fait un ou plusieurs trous d'épingle dans ce papier, on obtient sur l'écran autant d'images très nettes des charbons de l'arc (126).

Dans toutes ces expériences, on s'assurera que l'image reste la même, quelle que soit la forme de l'ouverture, pourvu qu'elle soit petite; mais que la netteté diminue à mesure qu'on se rapproche de l'ouverture, jusqu'au moment où l'on n'a plus sur l'écran qu'une ombre nette des bords de cette ouverture.

CONSTRUCTION DE DIVERS PHOTOMÈTRES.

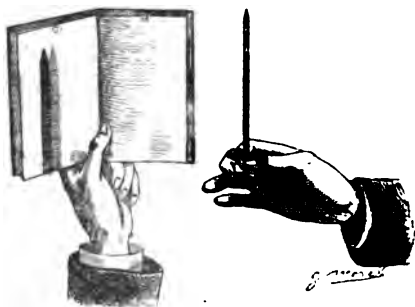
7. Photomètre à écran diffusant. — Construire une boîte en bois sans couvercle, dont le fond et deux faces latérales opposées sont des carrés de 20^{cm} de côté, les deux autres faces n'ayant que 5^{cm} de hauteur. Percer une ouverture au milieu du fond ($d = 5^{\text{cm}}$); et pratiquer, au milieu de l'une des grandes faces, une fente longitudinale qui servira à guider le mouvement d'un écran de carton noirci ($25^{\text{cm}} \times 25^{\text{cm}}$). Mettre enfin contre l'ouverture et à l'intérieur de la boîte, un verre dépoli ($8^{\text{cm}} \times 8^{\text{cm}}$) ou une feuille de papier blanc que l'on fera tenir avec des pointes ou de la cire molle.

Pour fixer la position de l'œil, on disposera à 20^{cm} en avant du photomètre un écran de carton percé d'un trou ($d = 1^{\text{cm}}$) à la hauteur du verre dépoli (*fig. page 47*).

8. Photomètre à ombres. — On peut faire une mesure photométrique sans aucun appareil spécial, en égalisant les éclats des ombres portées par un crayon sur un papier tenu à la main. On aura soin de placer le crayon de manière à amener les ombres juste au contact pour faciliter leur comparaison.

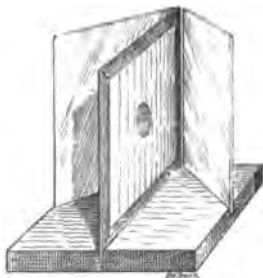
Comme on observe en général par diffusion *en avant* du papier,

il faudra faire la comparaison en plaçant les deux sources et l'œil dans des directions peu inclinées sur l'écran. Si, en effet, l'un des éclairéments était oblique, on reconnaîtrait aisément que



l'éclat relatif des deux ombres varie dans d'énormes proportions quand on déplace l'œil. Cet effet est beaucoup plus marqué avec du papier brillant qu'avec du papier mat. — L'effet de l'obliquité des rayons est, au contraire, beaucoup atténué si l'on observe par transparence.

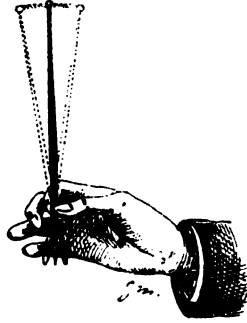
9. Photomètre à tache translucide. — Faire tomber sur une feuille de papier mat quelques gouttes de paraffine ou de stéarine fondue qu'on étalera sur une surface d'environ 2cm^2 . Après solidification, enlever l'excès de matière avec un couteau et chauffer doucement le papier pour bien y incorporer le corps fondu. Coller enfin cette feuille de papier sur un cadre plat en carton ou en métal ($10\text{cm} \times 10\text{cm}$).



Couper d'autre part deux fragments ($10\text{cm} \times 7\text{cm}$) d'un miroir plan, puis faire trois traits de scie à 45° dans une planchette ($10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 1\text{cm}$, 8), mettre l'écran dans la fente du milieu et faire tenir les miroirs en les entrant, par leurs petits côtés, dans les fentes latérales.

L'observation se fera en plaçant l'œil dans le plan de l'écran et l'on regardera les images de la tache translucide dans les deux miroirs. — On prendra, comme position d'équilibre, la moyenne des deux positions pour lesquelles cette tache disparaît sur l'une des faces de l'écran, puis sur l'autre.

10. Photomètre à bille d'acier. — Fixer une bille d'acier neuve ($d = 0^{\text{cm}},5$) à l'extrémité d'une baguette quelconque, en la faisant tenir avec un peu de cire molle. — Les deux sources

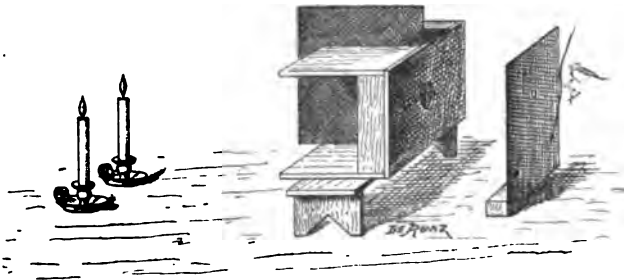


étant placées dans des directions symétriques, on modifiera les distances pour obtenir l'égalité des deux rubans lumineux que l'on aperçoit en agitant à la main la baguette qui porte la bille brillante. Cet appareil se prête particulièrement bien à la mesure de l'intensité d'une petite source très peu éclairante (97).

MESURES PHOTOMÉTRIQUES.

Les expériences de photométrie doivent être faites autant que possible dans l'obscurité complète, les murs mêmes de la salle devraient être peints en noir.

11. Loi du carré des distances. — Mettre deux bougies,



ou, mieux encore, deux lampes à pétrole à environ 80^{cm} en arrière du photomètre à écran diffusant (VI, 7), que l'on placera à la hauteur des flammes. Disposer l'écran qui glisse dans le photomètre

de manière que les deux plages éclairées soient exactement juxtaposées. Ajuster enfin les distances des lampes à l'écran de manière à obtenir l'égalité d'éclairement. Ces distances seront mesurées à quelques millimètres près.

Sans toucher à la lampe n° 1, on retirera alors la lampe n° 2 et on lui substituera une troisième lampe que l'on réglera de manière qu'elle produise le même éclairement. — Laisant ensuite la lampe n° 1 et le photomètre en place, on éclairera la seconde moitié de l'écran du photomètre simultanément avec les lampes n° 2 et n° 3 placées côte à côte. On cherchera alors à quelle distance il faut les transporter toutes les deux pour retrouver encore l'égalité d'éclairement. La loi du carré des distances se trouve-t-elle vérifiée?

12. Loi du cosinus de l'angle d'incidence. — Placer deux lampes pareilles de part et d'autre du plan de symétrie d'un photomètre à écran diffusant (VI, 7) de manière qu'elles envoient la lumière sous des incidences de quelques degrés, égales, mais de sens contraires.

Établir alors l'égalité d'éclat des deux moitiés de l'écran en réglant convenablement les distances.

Si l'on retire l'écran auxiliaire qui fixait la position de l'œil sur la normale au verre dépoli, on constatera que l'équilibre que l'on vient de réaliser se trouble complètement dès qu'on déplace l'œil vers la droite ou vers la gauche. On remplacera alors le verre dépoli par une feuille de papier blanc et l'on observera que la diffusion est beaucoup plus isotrope et que l'égalité d'éclat subsiste presque exactement quand on déplace l'œil. — Et l'on pourra continuer l'expérience.

L'une des sources étant maintenant placée sur la normale à 1^m environ de l'écran diffusant, disposer l'autre source de manière qu'elle envoie la lumière sous des incidences de 45°, puis de 60°, en réglant sa distance au photomètre de manière à rétablir toujours l'égalité d'éclairement. La loi du cosinus se trouve-t-elle vérifiée?

13. Mesure d'une intensité, d'un éclat et d'un éclairement. — *Intensité.* — Comparer plusieurs bougies de même qualité en réglant les flammes à une même hauteur. A combien près les intensités sont-elles égales?

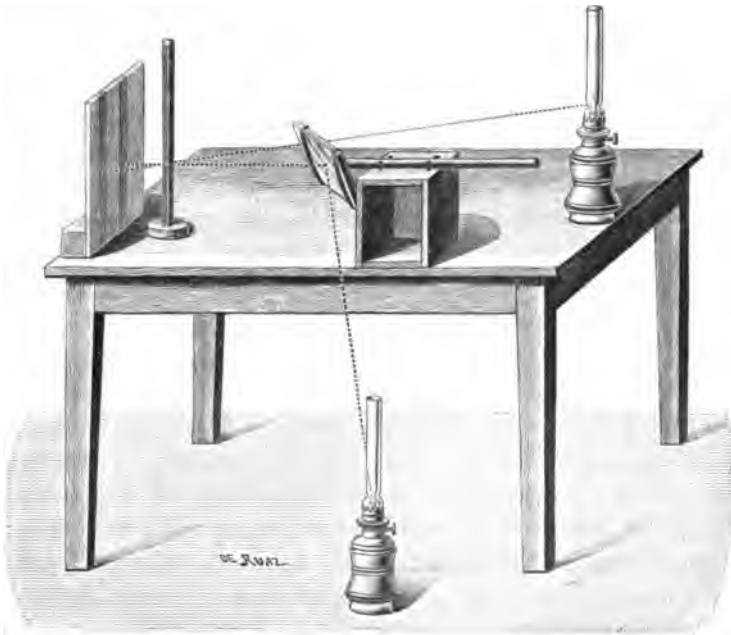
— Placer ensuite une bougie à une distance d'environ 50^{cm} sur la normale à l'écran photométrique et chercher à quelle distance

il faut placer une lampe à huile ou à pétrole pour obtenir l'égalité d'éclairement. Combien la lampe vaut-elle de bougies?

Éclat. — On fera encore une mesure en prenant comme sources de lumière des ouvertures égales ($d = 1^{\text{cm}}$) découpées au canif ou à l'emporte-pièce dans des cartes de visite et placées l'une devant la flamme d'une lampe à pétrole, l'autre devant une flamme de gaz ou d'acétylène. Les distances à l'écran photométrique seront mesurées à partir de ces diaphragmes et l'expérience fournira le rapport des éclats des deux flammes.

Éclairement. — En se servant d'un photomètre à tache translucide placé à l'entrée d'une caisse fermée un peu longue renfermant comme source de comparaison une bougie que l'on déplacera dans l'axe de cette caisse, on pourra mesurer l'éclairement sur les différentes parties des parois verticales d'une salle (197).

14. Variation de l'intensité avec la direction de l'émission. — La lampe étudiée sera d'abord placée sur le sol, puis



élevée verticalement de plus en plus haut, et l'on renverra sur le photomètre la lumière qu'elle émet, en se servant d'un miroir plan

($10^{\text{cm}} \times 10^{\text{cm}}$) disposé de manière à pouvoir tourner autour du rayon réfléchi. Pour ce montage, on peut, par exemple, couper un morceau de manche à balai ($l = 40^{\text{cm}}$) par un trait de scie à 45° sur les génératrices, clouer une planchette sur la section oblique, fixer le miroir sur cette planchette par deux bracelets de caoutchouc, et placer le manche cylindrique de ce porte-lumière sur un support horizontal (caisse en bois; $h = 20^{\text{cm}}$), entre quatre clous qui guideront ses mouvements de rotation.

La lampe étudiée étant à une hauteur déterminée, disposer une lampe de comparaison pour obtenir l'égalité d'éclairement sur le photomètre, et calculer l'intensité de la source d'après la loi du carré des distances, en considérant le pouvoir réflecteur du miroir comme une constante. On représentera les expériences en construisant une courbe dont les rayons vecteurs seront proportionnels aux intensités dans les directions correspondantes.

— On pourra ensuite munir la lampe d'un globe de verre dépoli et l'on se rendra compte de la manière dont la répartition des intensités est modifiée.

15. Sources d'espèces différentes. Ombres colorées. —

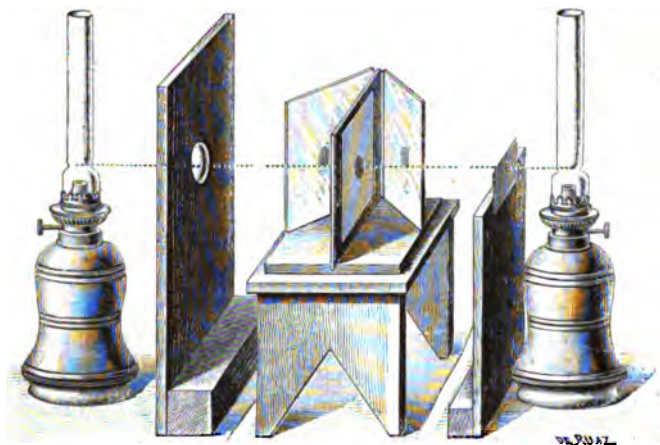
On essaiera de faire une mesure photométrique avec deux sources de natures différentes telles qu'une bougie, une lampe à pétrole ou une lampe à incandescence par le gaz, une lampe électrique à incandescence ou à arc, la lumière oxyhydrique ou la lumière du jour. — On constatera qu'au moment où l'on a des éclairagements à peu près égaux, les deux plages de l'écran apparaissent avec des couleurs différentes, dont la différence s'exagère par le contraste et rend toute mesure précise impossible.

En se limitant à la précision que l'on peut obtenir par l'observation à l'œil nu, on comparera les débits des sources en même temps que leurs intensités et l'on en déduira les prix de revient des différents modes d'éclairage. — On déterminera, par exemple, le prix de la bougie-mètre-mètre carré-heure avec une lampe électrique à incandescence utilisée sous des voltages croissants, et l'on se rendra compte, notamment, de l'économie qu'il peut y avoir à n'utiliser les lampes à incandescence que sous un voltage bien supérieur au voltage normal.

— Si, dans ces expériences, on regarde l'écran photométrique à travers un verre rouge, qui ne laisse passer qu'une portion étroite du spectre, on pourra faire avec précision la comparaison des inten-

sités, mais cette mesure n'aura de sens, naturellement, que pour cette couleur rouge (spectrophotométrie).

16. Projecteurs. Lentilles diaphragmées. — Placer une lampe au foyer d'un verre convergent pour binocle ($f = 15\text{cm}$), fixé dans une planchette verticale ($30\text{cm} \times 10\text{cm} \times 1\text{cm}$). Mesurer



l'intensité de ce projecteur par comparaison avec une lampe semblable devant laquelle on placera une carte percée d'une ouverture circulaire ($d = 1\text{cm}$) et fixée par exemple sur une planchette verticale ($22\text{cm} \times 10\text{cm} \times 1\text{cm}$).

Lorsque l'égalité d'éclairement sera obtenue, les distances au photomètre seront mesurées à partir de la lentille, d'une part, et à partir du diaphragme, d'autre part.

Le projecteur éclaire-t-il comme si toute la surface de la lentille était lumineuse et possédait le même éclat que la flamme? — L'éclairement est-il réduit de moitié si l'on couvre la moitié de la lentille?

17. Pouvoir réflecteur. — On prendra comme miroirs d'abord une lame de glace, ou même de verre, que l'on aura noircie sur sa face postérieure; puis cette même lame avec ses deux faces réfléchissantes et enfin un miroir plan étamé ou argenté.

— Pour mesurer un pouvoir réflecteur, déterminer d'abord le rapport des intensités de deux lampes, puis recommencer l'expérience en remplaçant l'une de ces lampes par son image virtuelle dans le miroir et déduire de ces deux déterminations le rapport de

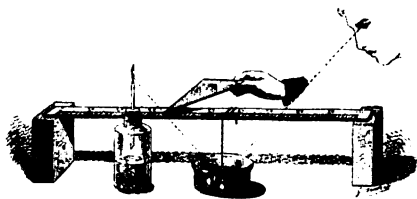
l'intensité de l'objet à l'intensité de l'image. — On étudiera les variations du pouvoir réflecteur pour des incidences croissantes.

Diffusion. — Allumer une lampe à acétylène (VI, 2) donnant une flamme verticale étroite et longue et la placer dans la lanterne de projection ou même dans une simple caisse en bois ($20^{\text{cm}} \times 20^{\text{cm}} \times 50^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}$) couverte par une plaque de tôle ($25^{\text{cm}} \times 25^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}}, 1$) reposant sur les têtes de quatre clous (*fig. page 65*). Dans le paroi de la caisse, et à la hauteur de la flamme, on aura pratiqué une fente verticale ($4^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}}, 5$) que l'on fermera extérieurement par une plaque de verre dépoli tournant sa face polie vers la lumière.

Pour étudier la diffusion de la lumière par transmission, on considérera la plaque de verre éclairée comme une source de lumière et l'on construira la courbe des intensités dans les différentes directions horizontales en ayant soin de croiser les expériences pour éliminer les variations de la source. On se servira d'un photomètre à tache translucide dont la tache n'aura pas plus de $0^{\text{cm}}, 5$ de large et qui sera toujours placé de manière à recevoir normalement la lumière — et l'on prendra comme source de comparaison une seconde lampe à acétylène.

LOIS DE LA RÉFLEXION. MIROIRS PLANS.

18. Réflexion à la surface de l'eau. — Installer un mètre horizontalement en le faisant reposer sur deux briques ($h = 20^{\text{cm}}$);



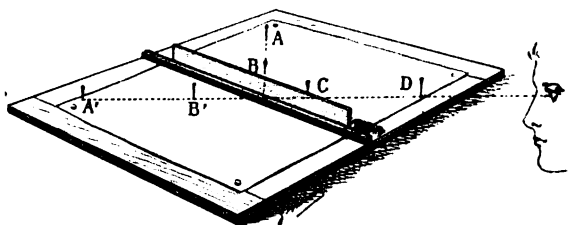
placer en dessous un petit cristallisoir contenant de l'eau noircie avec de l'encre, et suspendre au milieu du mètre un fil à plomb pénétrant dans l'eau.

Placer une bougie ou une petite lampe tout près d'une division déterminée, et regarder son image en plaçant l'œil de manière que la ligne de visée passe par le pied du fil à plomb. Le rayon réfléchi

reste-t-il dans le plan d'incidence? L'angle d'incidence est-il égal à l'angle de réflexion? Quelle difficulté rencontre-t-on qui limite la précision des mesures? (188).

19. Procédé graphique. — Découper une bande rectangulaire ($20^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}, 5$) dans un miroir plan, la faire tenir contre une règle carrée au moyen d'une trace de cire molle, et poser le tout au milieu d'une feuille de papier fixée sur une planche à dessin.

Piquer une épingle A verticalement à environ 20^{cm} en avant du miroir; en mettre une autre B, plus près du miroir et placer l'œil dans une direction telle que ces deux épingles, vues par réflexion, semblent se projeter l'une sur l'autre. Piquer alors deux autres épingles C et D pour jalonner la marche du rayon réfléchi.



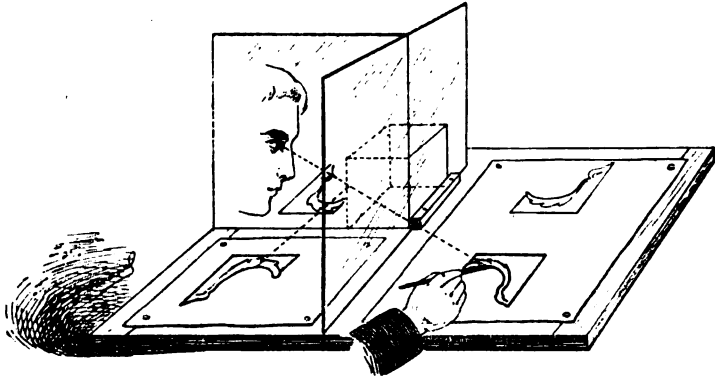
Ces expériences seront répétées pour différentes positions de l'épingle B, de manière à avoir des inclinaisons très différentes du rayon incident. On marquera la trace du miroir, puis on l'enlèvera et l'on tracera au crayon les lignes AB et CD. Ces droites se coupent-elles sur le miroir et l'angle d'incidence est-il égal à l'angle de réflexion? Les prolongements des droites CD passent-ils tous par un même point?

— Quand on aura déterminé de cette manière l'image virtuelle A' de A, on replacera le miroir, et l'on s'assurera que, si l'on pique une épingle en A', cette épingle vue par-dessus le bord du miroir paraît être en coïncidence avec l'image de la première, et cela quelle que soit la position où l'on place l'œil pour faire l'observation. — On pourrait aussi apercevoir l'épingle A' à travers une petite ouverture que l'on aurait pratiquée dans l'argenture (157, 174, 201, 215, 217).

20. Illusions produites par les glaces sans tain. — Mettre des bougies égales dans deux bougeoirs pareils. Placer l'une d'elles devant une glace sans tain et mettre l'autre derrière la glace,

à l'endroit où se trouve l'image de la première. Quand on allume celle-ci, l'autre paraît s'allumer aussi, mais on peut impunément passer la main dans cette flamme virtuelle, et c'est en vain qu'on chercherait à l'éteindre (56, 63, 116).

21. Reproduire un dessin. — Découper une glace sans tain ($30^{\text{cm}} \times 20^{\text{cm}}$) et un miroir plan ($20^{\text{cm}} \times 20^{\text{cm}}$); les placer verticalement et à angle droit sur la planche à dessin, en réglant leur position, par exemple, avec un cube en verre (presse-papier) contre



lequel on les fera adhérer avec une trace de cire molle. — Le dessin à reproduire sera placé dans l'angle des deux miroirs et l'on mettra une feuille de papier de l'autre côté de la glace sans tain.

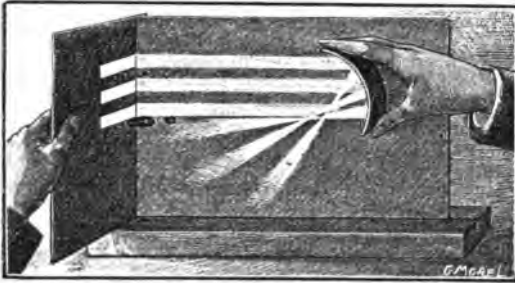
En commençant à suivre au crayon les contours de l'image réfléchie une fois ou de l'image réfléchie deux fois, on s'assurera tout d'abord que l'image virtuelle est bien dans le plan où l'on dessine, c'est-à-dire qu'elle ne subit aucun déplacement apparent par rapport à la pointe du crayon quand on change la position de l'œil. On continuera ensuite le dessin en plaçant l'œil de manière que la réflexion se fasse sous une incidence assez grande pour que l'on ait suffisamment de lumière. Comment les dessins obtenus sont-ils orientés? Sont-ils symétriques ou superposables?

MIROIRS COURBES.

22. Convergence des rayons. — **Images.** — Prendre comme point lumineux une petite flamme d'acétylène éloignée à un distance égale à 100 fois sa hauteur, et recevoir la lumière sur

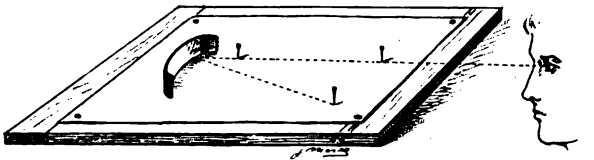
un miroir cylindrique concave (arc = 10^{cm} ; $h = 5^{\text{cm}}$; $R = 20^{\text{cm}}$) placé sur une feuille de papier, ou contre un verre dépoli ($30^{\text{cm}} \times 30^{\text{cm}}$) dont le plan passe presque par la source lumineuse.

Le faisceau sera limité par un diaphragme de carton dans lequel on aura pratiqué trois fentes ($0^{\text{cm}}, 5 \times 5^{\text{cm}}$) distantes de $2^{\text{cm}}, 5$ et



l'on observera sur l'écran la trace des rayons incidents et des rayons réfléchis. — Le miroir étant placé sous une incidence considérable, les rayons réfléchis sont-ils concourants? Sont-ils tangents à l'arc de caustique que l'on obtient en retirant le diaphragme qui limite le faisceau? La convergence est-elle améliorée pour des incidences de plus en plus voisines de la normale? Que devient l'arc de caustique dans ce cas? L'image finale se trouve-t-elle au point de rebroussement? (58, 66).

23. Procédé graphique, images réelles. — Opérer sur la planche à dessin comme pour le miroir plan (VI, 19), mais en se servant d'un miroir cylindrique concave. On peut aussi se



servir d'un miroir sphérique, que l'on obtiendra, faute de mieux, en coupant une bande étroite ($1^{\text{cm}}, 5 \times 15^{\text{cm}}$) dans une boule de verre argentée de grand diamètre (boule de jardin).

Placer d'abord une épingle dans une position très excentrée et repérer avec des couples d'épingles trois rayons réfléchis

qui seront ensuite tracés au crayon afin d'étudier la manière dont ils s'entrecoupent. On répétera ensuite l'expérience sous une incidence presque normale pour obtenir des rayons concourants.

Centre. — Déterminer le centre en cherchant l'endroit vers lequel on doit amener une épingle pour qu'elle arrive à rejoindre son image. La concordance doit se conserver quand on déplace l'œil pour recevoir l'un après l'autre tous les rayons réfléchis.

Foyer. — Placer une épingle à une distance du miroir égale à un demi-rayon et jalonner avec des épingles les rayons réfléchis. Le faisceau réfléchi est-il cylindrique et parallèle à l'axe secondaire?

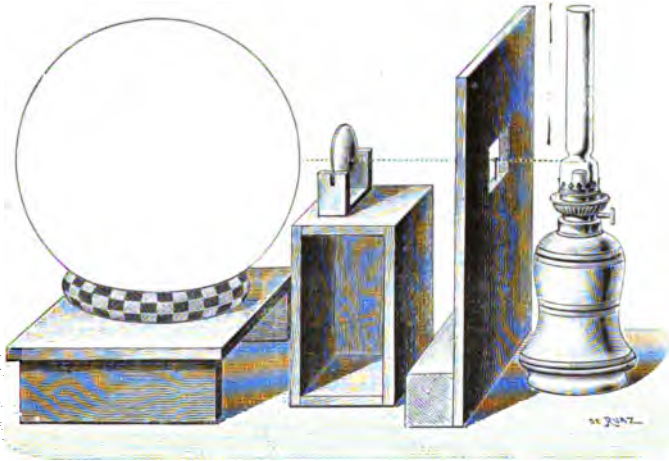
Formules. — Placer une épingle A au delà du centre, en placer une autre A' à l'image de A. S'assurer que cette épingle est bien placée en regardant si la coïncidence apparente avec l'image persiste quelle que soit la position de l'œil. Mesurer ensuite les distances qui séparent le centre, l'objet et l'image du miroir. La formule classique se trouve-t-elle vérifiée? — On construira, de même, l'image A'B'C' d'un triangle rectangle ABC de petites dimensions ($5\text{cm} \times 3\text{cm}$). L'image est-elle semblable à l'objet? Est-elle homothétique de cet objet par rapport au centre?

Image d'une droite. — Jalonner, enfin, avec des épingles une droite un peu grande située au delà du centre, et déterminer les images des différents jalons. L'image de la droite est-elle rectiligne?

24. Images virtuelles. — Prendre un miroir cylindrique convexe ou concave, placer une épingle dans une position telle que son image soit virtuelle et jalonner la marche de quelques rayons réfléchis (VI, 19). Enlevant ensuite le miroir, on s'assurera que les prolongements des rayons passent par un même point, on mesurera les distances et l'on verra si la formule classique se vérifie. — On arriverait aussi à placer une épingle là où se trouve l'image virtuelle en regardant par-dessus le bord du miroir pour s'assurer de l'exactitude de sa position.

— On peut illustrer la formation des images virtuelles en déterminant optiquement le centre d'un miroir convexe par un procédé d'*autocollimation*. On se sert d'une lentille à court foyer en employant comme objet un écran de carton blanc percé d'une ouverture dans laquelle on met une épingle, et l'on amène l'image finale dans le plan de l'écran. On détermine ensuite le

centre du miroir en cherchant le point où vient se former l'image réelle quand on retire le miroir.



25. Projections, images aériennes. — Projeter sur le mur et sur un écran qu'on déplace à la main les images d'une flamme *papillon* pour les différentes distances à un miroir concave. On répétera l'expérience en diaphragmant le miroir avec une feuille de papier percée de plusieurs ouvertures, et l'on étudiera l'entrecroisement des rayons en déplaçant l'écran dans le faisceau réfléchi.

En plaçant, en particulier, la source vers le centre, et en interceptant la lumière qu'elle enverrait directement dans l'œil, on constatera combien est complète l'illusion que l'on obtient de l'existence réelle d'une flamme renversée à l'endroit où se trouve l'image de la source. — Cette expérience se fait quelquefois en mettant au centre du miroir un vase sous lequel on suspend un bouquet renversé bien éclairé. Un observateur, situé à quelque distance du miroir, croit voir très nettement un bouquet semblable redressé et placé dans le vase.

On se rendra compte de l'existence d'un champ de visibilité limité par le miroir, et l'on notera les apparences que l'on observe en regardant le miroir pendant que l'on approche progressivement l'œil du point où se trouve l'image de la flamme. — On étudiera aussi les aspects successifs de l'image de l'œil avec lequel on regarde quand on se rapproche progressivement du miroir. Y

a-t-il une position pour laquelle le champ se réduit à l'ouverture de la pupille ?

RÉFRACTION DANS L'EAU.

26. Retour inverse de la lumière. — Mettre une feuille de papier au fond d'une cuve quelconque, la faire tenir avec quelques cailloux et verser de l'eau dans la cuve. Poser une règle



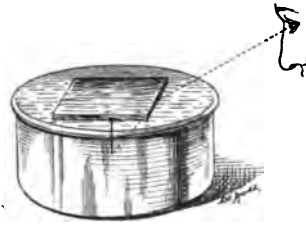
horizontalement sur les bords de la cuve et projeter l'ombre de cette règle sur la feuille de papier au moyen d'une petite lampe à acétylène (VI, 2).

A l'aide d'une seconde règle s'appuyant sur la première et passant par la limite de l'ombre, on constatera qu'il y a eu brisure du rayon lumineux. Se protégeant ensuite avec un écran contre la lumière venant directement de la source, on cherchera où il faut placer l'œil pour que le bord de l'ombre *paraisse* se trouver en ligne droite avec le bord de la règle. Cette expérience confirme-t-elle le principe du retour inverse de la lumière ?

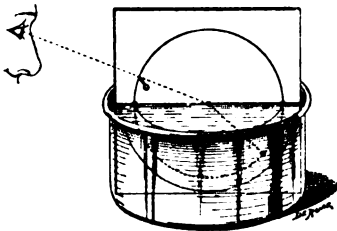
27. Angle limite. — Enfoncer un morceau d'aiguille à tricoter dans un trou percé au centre d'une planchette ($10^{\text{cm}} \times 10^{\text{cm}}$). Mettre, d'autre part, de l'eau dans un cristalliseur en le remplissant jusqu'au bord et faire flotter la planchette sur l'eau, l'aiguille en dessous.

Remonter progressivement l'aiguille jusqu'à ce qu'on ne puisse plus apercevoir la pointe en dessous de la planchette, même en plaçant l'œil au niveau de la surface réfringente. Retirer alors la planchette de l'eau et mesurer la longueur de l'aiguille ainsi que sa

distance au bord de la planchette : le rapport de ces deux longueurs donnera la *tangente* de l'angle limite (63).



28. Loi de la réfraction. — Tracer une circonférence ($R = 6^{\text{cm}}$) sur une planchette ($14^{\text{cm}} \times 14^{\text{cm}}$); marquer le centre et les extrémités du diamètre parallèle à l'un des bords, au moyen



de trois petites pointes complètement enfoncées; puis, sur un quart de la circonférence, planter encore quelques pointes ($l = 2^{\text{cm}}, 5$) que l'on enfoncera légèrement.

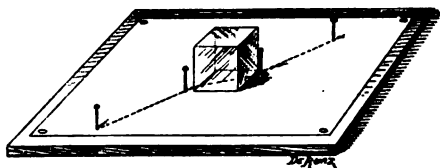
Mettre un cristalliseur ($V = 2^{\text{l}}$) sur une feuille de papier blanc, le remplir d'eau et y placer la planchette verticalement en l'enfonçant jusqu'au diamètre que l'on a marqué. — Viser alors successivement chacune des pointes immergées et chercher où l'on doit planter une épingle sur la circonférence pour qu'elle paraisse en ligne droite avec le centre et la pointe visée.

Relever ensuite au rapporteur les valeurs correspondantes des angles d'incidence et de réfraction, et construire la courbe représentative. La formule $i = nr$ suffit-elle pour représenter les expériences au degré de précision des mesures? A-t-on une courbe représentative plus voisine d'une ligne droite en prenant comme coordonnées les *sinus* des angles au lieu des angles eux-mêmes? (63).

RÉFRACTION DANS LE VERRE. — PROCÉDÉS GRAPHIQUES.

29. lame à faces parallèles. — Mesurer l'épaisseur d'un cube de verre (5^{cm}), tracer sur le papier deux traits parallèles dont la distance soit égale à cette épaisseur et poser le cube de verre exactement entre ces deux traits.

Jalonner avec des épingles la marche de quelques rayons lumineux passant par un même point, retirer le cube de verre et tracer



au crayon le trajet de la lumière. Les rayons émergents sont-ils parallèles aux rayons incidents? Les sinus des angles d'incidence et de réfraction sont-ils dans un rapport constant?

30. Prisme. — Poser un prisme de verre sur le papier, jalonner un rayon incident au moyen de deux épingles et constater la déviation de ce rayon, puis le minimum de déviation. — Le prisme étant dans la position correspondant à ce minimum de déviation, placer deux épingles sur le rayon émergent, tracer au crayon la marche de la lumière et mesurer sur le dessin l'angle du prisme, ainsi que les angles d'incidence et d'émergence. Les rayons sont-ils placés symétriquement par rapport au prisme? quelle est la valeur de l'indice? (157, 174, 201, 215, 217).

— Ces expériences peuvent être faites en utilisant l'ombre d'une tige verticale placée devant une bougie. Cette ombre paraîtra se réfracter comme les rayons qui la limitent (41).

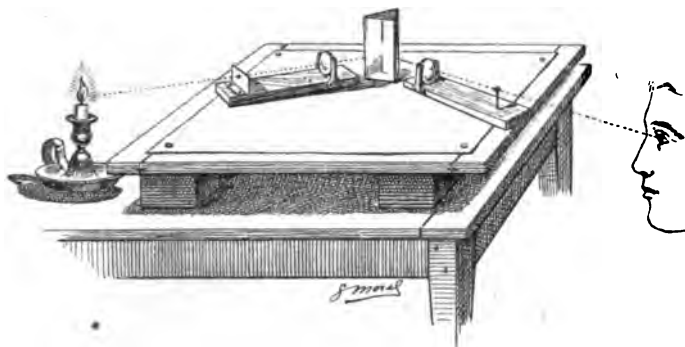
31. Principe du goniomètre et du spectroscopie. — *Montage.* — Fixer un objectif de lunette ($f = 15\text{ cm}$) à l'extrémité d'une planchette ($20\text{ cm} \times 3\text{ cm} \times 1\text{ cm}$). On le fera tenir au moyen de deux lames de zinc ($1\text{ cm}, 5 \times 4\text{ cm} \times 0\text{ cm}, 05$) clouées sur les côtés de la planchette et ployées en forme de gouttière à leur partie supérieure.

Pour matérialiser la position du foyer, on projettera d'abord sur un morceau de papier l'image d'une bougie située à une distance de plusieurs mètres ($d = nf$). Le foyer est alors, comme on sait, à une petite distance en avant de cette image ($d' = \frac{1}{n}f$) : on piquera une épingle là où se trouve le foyer.

Monter une seconde lentille de la même manière. Clouer en son foyer un diaphragme à fente fait d'une lame de zinc ($6\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 0\text{ cm}, 05$) pliée en équerre ($3\text{ cm} + 3\text{ cm}$), dans la partie libre de laquelle on aura fait un trou ou une fente verticale, large tout au plus de $0\text{ cm}, 1$.

Expériences. — Poser le *collimateur* sur une planche à dessin, l'immobiliser avec deux pointes, et éclairer la fente avec une lampe ou, même, avec une bougie. Recueillir la lumière avec le *visueur* en faisant coïncider l'épingle avec l'image de la fente, et tracer un trait le long de ce viseur pour en repérer la position.

Si l'on place maintenant le prisme devant le collimateur, et si



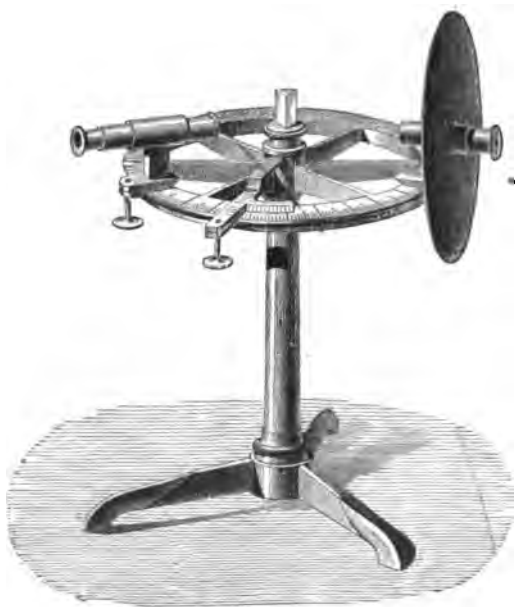
l'on cherche à orienter le viseur dans la direction du faisceau réfracté, on constatera tout d'abord l'existence d'une dispersion. Mettant alors le prisme au minimum de déviation, on visera dans le spectre une couleur déterminée, ou bien on remplacera la bougie par une flamme monochromatique (**VI, 104**), et l'on marquera au crayon la nouvelle position du viseur. — On mesurera ensuite au rapporteur l'angle des deux positions du viseur, c'est-à-dire l'angle défini par les deux traits de crayon que l'on a tracés; et l'on aura la valeur de la déviation minima produite par le prisme pour la couleur choisie.

Pour achever la détermination de l'indice, il n'y a plus qu'à mesurer l'angle du prisme. Il suffit pour cela de marquer au crayon sa trace sur le plan du papier. — Si les dimensions du prisme sont trop faibles pour que ce procédé soit suffisamment précis, on fixera le prisme sur une planchette ($20^{\text{cm}} \times 3^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}$) avec de l'arcanson, on l'orientera de manière à recevoir sur l'une de ses faces la lumière venant du collimateur et l'on recueillera dans le viseur le faisceau réfléchi. On marquera alors au crayon la position de la planchette qui porte le prisme. On fera ensuite tourner le prisme et on l'amènera dans une position telle que la lumière réfléchie par la seconde face soit recueillie par le viseur qui n'aura

pas bougé. L'angle des deux positions de la planchette fera connaître l'angle du prisme.

Dans toutes ces mesures, on vérifiera qu'en raison du parallélisme **des rayons**, l'*orientation* seule des appareils importe. On n'aura pas **besoin**, en effet, de donner au prisme ou au viseur des *positions déterminées*, comme on serait obligé de le faire si l'on remplaçait les lentilles du **collimateur** et du viseur par de simples fentes — ce qui, du reste, serait **encore** très précis.

Réglage du goniomètre. — Si l'on se sert d'un *goniomètre* tout monté, on réglera d'abord la lunette et le collimateur sur

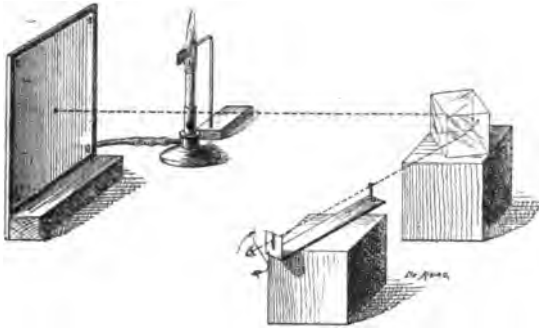


l'infini, comme nous l'indiquons plus loin pour le spectroscopé (VI, 104), on fixera ensuite le prisme sur la plate-forme avec un peu de cire molle, et ce prisme sera suffisamment bien orienté si l'image de l'arête, vue par réflexion dans la plate-forme, paraît être dans le prolongement de l'arête elle-même; ou bien si, s'aidant d'un fil à plomb, on place l'axe de l'appareil vertical ainsi que l'arête du prisme. — La mesure de l'indice se fait ensuite de la même manière qu'avec l'appareil schématique que nous venons d'étudier.

RÉFLEXION TOTALE. — PROPAGATION CURVILIGNE.

32. Mesure d'un indice. — *Montage.* — On fera les visées au moyen d'une fente et d'une épingle fixées aux extrémités d'une planchette ($20^{\text{cm}} \times 3^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}$). La fente ($2^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}},1$) sera pratiquée dans une lame de zinc ($4^{\text{cm}} \times 3^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}},05$) clouée en bout sur la planchette. On prendra comme source de lumière une feuille de papier placée à plusieurs mètres de distance et éclairée par une flamme monochromatique (**VI, 104**).

Expériences. — Mouiller d'eau un morceau de papier noir (papier aiguille), l'appliquer contre une face d'un cube de verre



et le recouvrir d'une lame de verre pour éviter l'évaporation. Poser le cube sur une planche à dessin en l'orientant de manière que la lumière se réfléchisse sur la face mouillée et que le faisceau réfléchi ait tourné d'environ un angle droit.

Chercher dans ce faisceau les zones de réflexion partielle et de réflexion totale, en ayant soin d'accommoder l'œil pour la vision à grande distance. On réglera la position du bloc de verre de manière que la limite de ces deux zones soit dans le champ et l'on immobilisera le cube dans cette position avec un peu de cire molle. Mettant alors l'œil sur la direction limite, on placera le viseur dans la direction du regard et l'on marquera sa trace au crayon.

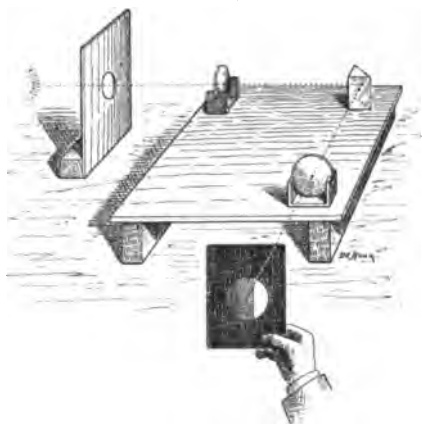
Sans toucher au cube de verre, placer ensuite le viseur perpendiculairement à la face de sortie, en opérant par autocollimation, c'est-à-dire en visant l'image réfléchi de l'épingle; et marquer au crayon la nouvelle position de ce viseur. — Pour cette visée, il sera

nécessaire de placer ce viseur à 10^{cm} au moins de la face réfléchissante, d'éclairer très vivement l'épingle du côté tourné vers le cube de verre et de mettre une feuille de papier noir derrière pour viser sur un fond obscur.

On mesurera enfin l'angle des deux positions que le viseur a occupées et l'on calculera l'indice du verre en fonction de celui de l'eau supposé connu.

— On pourra répéter l'expérience avec un autre liquide, alcool éthylique, chloroforme ou benzine, dont on calculera l'indice de réfraction en fonction de celui du verre que l'on vient de déterminer.

33. Projection du phénomène de la réflexion totale. — Retirer le condenseur de la lanterne, placer une lentille de projection ($f = 33^{\text{cm}}$) à 150^{cm} de la source, et diaphragmer le faisceau



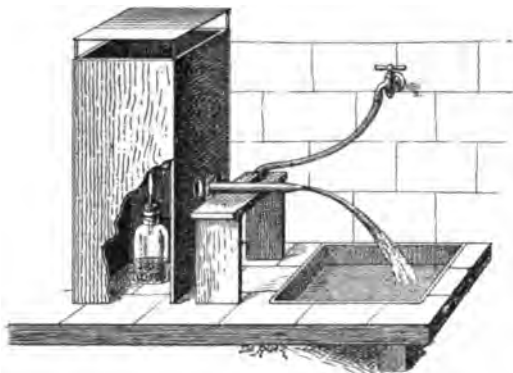
incident au moyen d'un écran percé d'une ouverture ayant un diamètre égal aux $\frac{4}{3}$ de celui de la lentille et placé dans son plan focal. Mettre un prisme à réflexion totale un peu au delà de la lentille, de manière à recueillir toute la lumière, et placer, immédiatement après, une autre lentille de projection ayant, si possible, une plus grande distance focale.

En plaçant un verre dépoli dans le plan focal de cette dernière lentille, on y trouvera une image de l'ouverture du diaphragme dans laquelle les zones de réflexion totale et de réflexion partielle seront très nettement séparées.

34. Fontaine lumineuse. — A défaut d'une lanterne de projection à lumière électrique ou oxhydrique, prendre comme source de lumière une lampe à acétylène à large flamme (**VI, 2**) enfermée

dans une cheminée en bois ($20^{\text{cm}} \times 20^{\text{cm}} \times 50^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}$) que l'on recouvrira d'une plaque de tôle ($25^{\text{cm}} \times 25^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}},1$) reposant sur les têtes de quatre clous. Un trou sera percé dans la paroi au niveau de la flamme ($D = 2^{\text{cm}}$).

La fontaine est constituée par un tube de verre ($l = 12^{\text{cm}}$; $D = 1^{\text{cm}},5$) ouvert à un bout, un peu étiré à l'autre extrémité



($d = 1^{\text{cm}}$) et soudé en son milieu sur le tube qui amène l'eau ($l = 12^{\text{cm}}$; $d = 1^{\text{cm}}$). L'extrémité large du gros tube est fermée par une plaque de verre ($2^{\text{cm}},5 \times 2^{\text{cm}},5 \times 0^{\text{cm}},15$) que l'on fait tenir avec un mastic fusible (I, 91). On fixe ce tube en T devant l'ouverture de la lanterne sur un support fait, par exemple, de trois planchettes clouées ensemble, et l'on fait écouler l'eau à vitesse modérée.

L'expérience étant faite dans l'obscurité, on constatera l'entraînement de la lumière par le jet d'eau jusqu'au point où il se brise. Si l'on place alors un verre rouge devant la lanterne, il semblera que l'eau elle-même a changé de couleur.

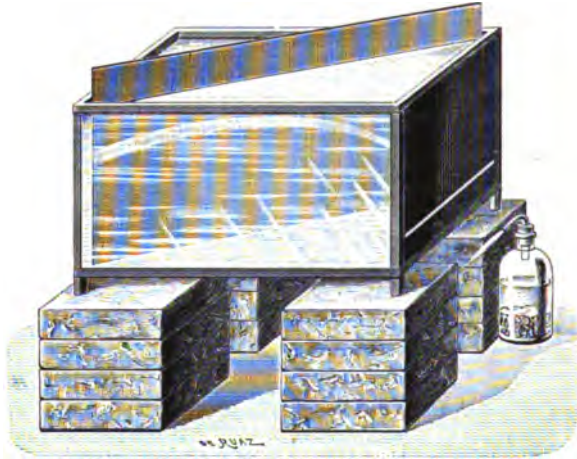
— On observe des phénomènes analogues avec une baguette de verre que l'on peut recourber en lui donnant les formes les plus complexes; la lumière qui entre par un bout de la baguette ne peut sortir que par l'autre extrémité (126).

35. Propagation curviligne de la lumière. Mirage. —

Placer un aquarium ($l \geq 50^{\text{cm}}$) sur un support robuste ($h = 20^{\text{cm}}$) fait avec des briques ou des carreaux de terre cuite, et le remplir à moitié d'eau pure, filtrée au papier. Verser ensuite, au fond de l'aquarium, de l'eau saturée de sel marin et filtrée, en se servant d'un entonnoir terminé par un tube de caoutchouc. — Au moment

du remplissage, les liquides sont séparés par des surfaces nettes qui s'estompent ensuite progressivement par suite de la diffusion.

Placer en avant de la cuve une lampe à acétylène à flamme rectiligne horizontale ($l = 5^{\text{cm}}$), (VI, 2). Mettre contre la face d'entrée



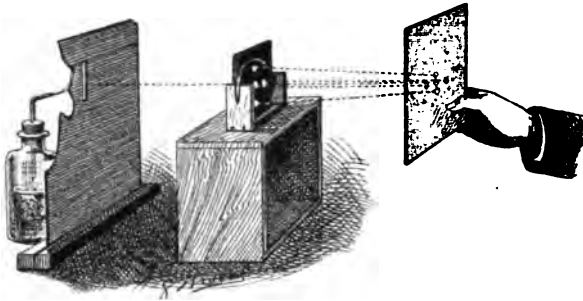
un écran de papier noir dans lequel on aura pratiqué une longue fente horizontale ($h = 0^{\text{cm}}, 5$) à 2^{cm} ou 3^{cm} du fond. Placer enfin, suivant une diagonale de l'aquarium, une lame de métal verticale, peinte en blanc, sur laquelle on pourra suivre le trajet de la lumière.

En réglant convenablement la position de la lampe et celle de la fente, on verra le faisceau lumineux monter dans le liquide *en suivant une ligne courbe*, puis se briser à la surface libre ou y subir la réflexion totale. On pourra même obtenir un phénomène inverse de celui du mirage, et avoir un faisceau lumineux qui monte jusque dans les couches de passage et redescend ensuite en suivant constamment une trajectoire curviligne.

LENTILLES.

36. Formation des images. — Prendre comme point lumineux une flamme d'acétylène horizontale (VI, 2), diaphragmée par une fente verticale, et recevoir la lumière sur une lentille de projections ($f = 33^{\text{cm}}$; $D = 10^{\text{cm}}$) que l'on aura recouverte d'un diaphragme de papier percé de quelques trous ($d = 0^{\text{cm}}, 7$).

Placer d'abord la lentille obliquement et déplacer une feuille de papier ou une lame de verre dépoli dans le faisceau transmis ; noter et décrire la marche des faisceaux élémentaires. — Redresser



ensuite la lentille pour obtenir la convergence des faisceaux élémentaires et la formation de l'image. Quelle inclinaison peut-on tolérer pour avoir une image acceptable ?

— On constatera que l'on obtient des images très suffisantes en prenant comme lentille un ballon plein d'eau. On peut se servir de ce ballon comme éclairer, comme loupe et comme projecteur (192).

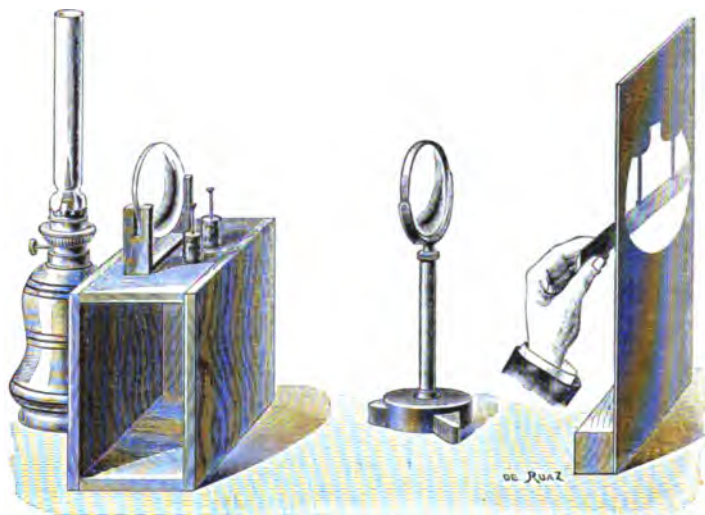
37. Convergence, grossissement. — Mettre la source de lumière au foyer d'une lentille de condenseur ($f = 12^{\text{cm}}$; $D = 9^{\text{cm}}$) tournant sa face la moins bombée vers la lumière, et prendre comme objets deux épingles que l'on placera verticalement devant ce condenseur, à environ 5^{cm} l'une de l'autre (*fig. page 68*).

Placer une lentille de projection à grande distance dans le faisceau lumineux et recevoir les images renversées des épingles sur un écran de carton blanc. Mesurer alors la distance de ces images et la distance des épingles elles-mêmes, puis les distances de la lentille à l'objet et à l'image. Le rapport de ces deux dernières longueurs est-il égal au grossissement ? — Pour quelle position l'image est-elle égale à l'objet ? La distance de l'objet à l'image est-elle alors minima ?

Ayant répété ces mesures pour différentes positions de la lentille, on calculera pour chaque position la convergence $\left(\frac{1}{p}\right)$ du faisceau émergent et celle du faisceau incident. Leur différence reste-t-elle constante ? Peut-on permuter l'objet et l'image ?

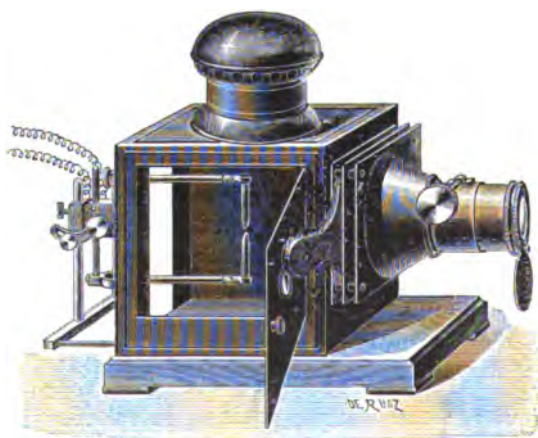
— On pourra remplacer les deux épingles par une *vue* quel-

conque que l'on placera renversée devant le condenseur. On fera plusieurs projections de l'objet sur un même verre dépoli que l'on



placera successivement à différentes distances et l'on s'assurera que l'on obtient des images semblables.

38. Lanterne magique. — Ayant disposé une *vue* renversée



devant le condenseur, comme dans l'expérience précédente, on projettera son image à grande distance sur un mur ou sur un écran

blanc. Comment la projection est-elle modifiée si l'on supprime le condenseur? Peut-on le remplacer par un verre dépoli?

— On peut obtenir des projections satisfaisantes d'objets très petits en prenant comme éclaircur un ballon plein d'eau et comme lentille de projection la loupe d'un compte-fil (192).

— Si l'on a à se servir d'une *lanterne de projection*, avant de placer la *vue* dans la glissière, on devra d'abord placer la source de lumière à sa place exacte, de manière à avoir un champ uniformément éclairé (A). Si le point lumineux n'est pas sur l'axe, on aperçoit sur l'écran une pénombre (C) excentrée du même côté



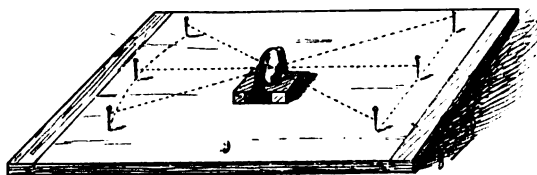
que le point lumineux. Si le point lumineux est sur l'axe mais ne se trouve pas au foyer, on a encore une pénombre (B) qui est bleue si le point lumineux est trop près des lentilles, et rouge dans le cas contraire.

39. Groupement des rayons. — Régler le condenseur de la lanterne de projection de manière à avoir un faisceau sensiblement cylindrique et tracer quelques traits à l'encre sur la surface extérieure du verre. Placer au delà et successivement, de 15^{cm} en 15^{cm}, d'abord une vue quelconque, puis un grillage métallique à larges mailles et une lame de verre sur laquelle on aura tracé un dessin. Mettre enfin à la suite de ces objets une lentille de projection qui sera placée de manière à projeter sur le mur l'image du dernier dessin.

On déplacera une feuille de papier dans le faisceau émergent et l'on cherchera si l'on y trouve successivement les images réelles de la source de lumière, du condenseur et des différents objets qui se trouvent en arrière de la lentille de projection, malgré la complication des diaphragmes interposés sur le trajet de la lumière (149).

40. Courbure des images, procédé graphique. — Monter un objectif de lunette ($f = 15^{\text{cm}}$) sur une planchette au moyen de deux lames de zinc ($1^{\text{cm}} \times 4^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}},05$) légèrement courbées en forme de gouttière et formant ressort, et placer cette lentille

sur une planche à dessin. Piquer trois épingles à environ 25^{cm} de la lentille, de manière à former une droite perpendiculaire à l'axe et longue d'environ 20^{cm} , puis chercher les images réelles de ces objets et les matérialiser en piquant de nouvelles épingles dans la planche; on reconnaîtra que ces épingles sont convenablement



placées à ce qu'elles paraissent bien se superposer à l'image même si l'on déplace l'œil.

Les images des trois points en ligne droite sont-elles elles-mêmes en ligne droite? La formule qui convenait pour les objets situés sur l'axe convient-elle encore pour les objets qui en sont notablement éloignés (201, 213)?

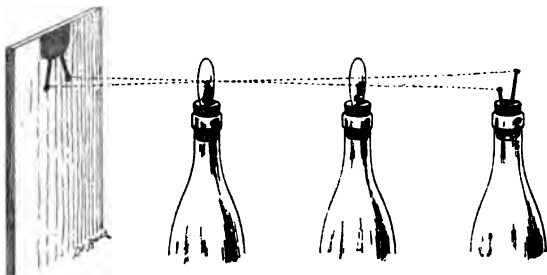
41. Objet virtuel. — Reprendre les dispositifs qui ont permis la mesure du grossissement d'une lentille convergente (VI, 37), projeter les images des épingles à une distance un peu grande ($3f$) au moyen d'une lentille auxiliaire, mesurer l'écartement de ces images et placer de nouveau la lentille étudiée entre la lentille auxiliaire et le plan où se formait l'image. — Chercher alors la nouvelle image. Est-elle *droite* pour toutes les positions de la lentille? La différence de convergence des faisceaux est-elle la même que dans le cas des images réelles?

— On étudiera de la même manière l'image réelle et agrandie qu'une lentille divergente peut donner d'un objet virtuel.

42. Images virtuelles. — Dans le cas où l'on obtient une image virtuelle, après avoir observé cette image à l'œil nu, placer une lentille auxiliaire dans le faisceau émergent de manière à obtenir des images réelles des deux épingles qui servent encore d'objet lumineux (VI, 37) et repérer ces images en piquant deux autres épingles dans une planchette. — Cette lentille auxiliaire et cette image réelle reproduisent schématiquement les phénomènes de la vision de l'image virtuelle par l'œil.

Retirant alors la première lentille, on cherchera où il faut placer un autre objet pour que son image se retrouve à la même

place que l'image précédente. Cet objet pourra encore être formé de deux épingles dont on réglerà l'écartement de manière que leurs images viennent se placer sur les épingles qui, tout à l'heure, ont matérialisé l'image réelle.



Les formules relatives à la convergence et au grossissement sont-elles encore vérifiées? Y a-t-il réciprocity entre les positions de l'objet et de l'image (175)?

43. Lentilles associées. — Si l'on dispose d'un jeu de verres pour binocles, on mesurera la distance focale d'un verre divergent en l'associant à un verre convergent que l'on choisira de manière à obtenir une convergence nulle. On s'aidera d'abord de ce qu'un objet rapproché, vu à travers ces verres, paraît grossi ou diminué s'il reste une convergence ou une divergence notable. Pour achever le réglage, on observera un objet très éloigné en déplaçant les verres devant l'œil d'un côté à l'autre: l'objet paraît suivre le mouvement ou se déplacer en sens inverse selon le signe de la convergence.

La distance focale du verre convergent sera déduite de la position de l'image que ce verre donne des objets les plus éloignés que l'on puisse apercevoir par la fenêtre ouverte.

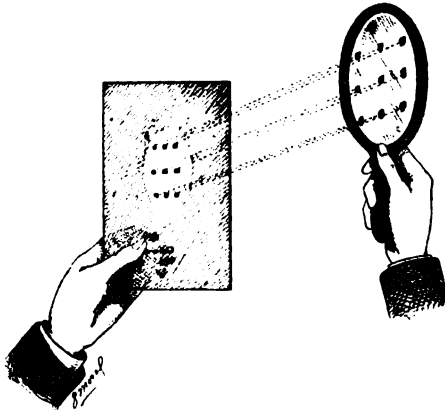
— On pourra enfin vérifier qu'en associant deux verres convergents, on ajoute leurs convergences. On pourrait même se servir exclusivement de cette remarque pour faire complètement la graduation de toute la série des verres.

CAUSTIQUES ET LIGNES FOCALES. APLANÉTISME.

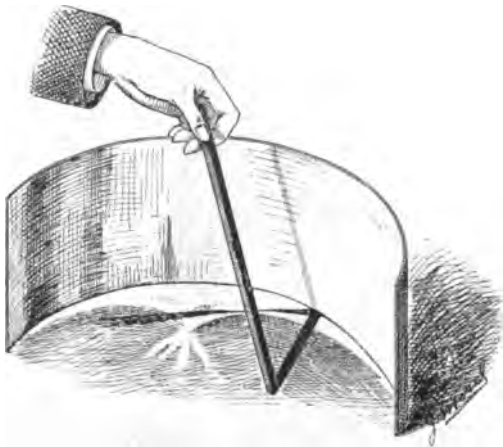
44. Miroir concave. — Placer un point lumineux au delà du centre du miroir, recevoir la lumière sous une incidence d'environ 45° et explorer le faisceau réfléchi avec un verre dépoli.

Pour pouvoir suivre l'entrecroisement des rayons, on mettra sur

le miroir quelques fragments de papier qui se projettent en noir sur l'écran. Les rayons paraissent-ils être tangents à deux surfaces? L'une de ces surfaces se réduit-elle exactement à une portion de la droite joignant le point lumineux au centre?



— Si l'on recouvre la majeure partie du miroir par une feuille de papier, le faisceau ne paraît-il pas simplement s'appuyer sur deux lignes focales? Deux rayons quelconques se rencontrent-ils? Quels



sont les groupes de rayons qui se rencontrent et comment sont-ils situés par rapport aux lignes focales?

Comment ces focales se déplacent-elles quand on diminue l'incidence?

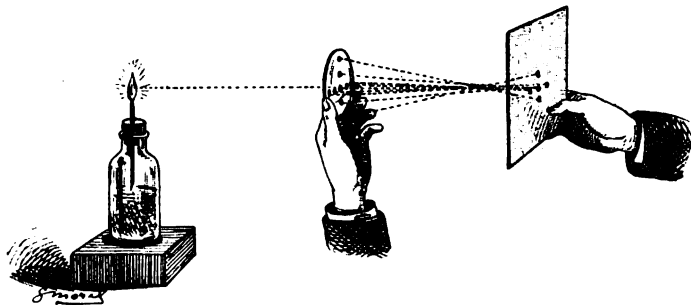
— On pourra montrer une section méridienne de la surface caustique avec le dispositif décrit pour l'étude de la formation des images dans les miroirs (VI, 22). Du reste, une simple feuille de fer-blanc courbée en forme de cylindre, ou même n'importe quel vase cylindrique, tel qu'un cristalliseur, au fond duquel on met une feuille de papier, permet de voir cette courbe. On peut suivre le mouvement d'enroulement des rayons en déplaçant sur le miroir l'ombre portée par une règle parallèle aux génératrices (126).

— On observera de même deux lignes focales en recevant obliquement la lumière d'une lampe éloignée sur une surface réfléchissante concave quelconque, cuiller, morceau de boule argentée, surface d'un verre de montre ou d'un verre de binocle, etc.

45. Lentilles. — Avec une lentille de projection inclinée sur le faisceau incident, on pourra répéter les mêmes expériences qu'avec le miroir.

On saisira la courbure de la première surface focale en suivant la trace du faisceau sur le verre dépoli; on observera la seconde surface focale réduite à une droite; et l'on étudiera l'entrecroisement des rayons.

— En diaphragmant la lentille, ou bien en se servant d'un verre de binocle, on verra l'étendue utile de la première surface focale diminuer et la trace du faisceau sur l'écran se rapprocher d'une ligne droite. On pourra ensuite voir comment les deux lignes focales se rapprochent, en diminuant de longueur, quand on redresse le système optique jusqu'à l'incidence normale.

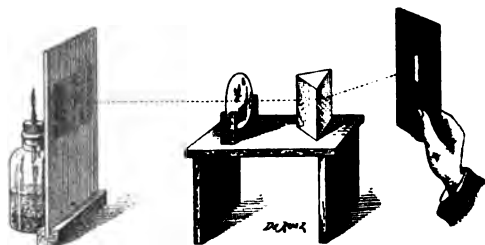


— Pour observer les *aberrations* de sphéricité d'une lentille, on placera une lentille de condenseur ($f = 10^{\text{cm}}$; $d = 9^{\text{cm}}$) sous l'incidence normale à une distance $2f$ d'une petite flamme d'acétylène,

et l'on couvrira l'autre face d'un écran de papier percé de quatre trous vers les bords, de quatre autres trous vers le milieu et d'un trou au centre. En suivant les rayons transmis avec une feuille de papier on devra trouver d'abord l'image fournie, par les rayons centraux puis le point de rencontre des rayons marginaux.

46. Lentilles cylindriques. — Voir les expériences sur l'astigmatisme artificiel (VI, 89).

47. Prisme. — *Montage.* — Placer devant la lanterne de projections un diaphragme percé d'un petit trou ($d = 0^{\text{cm}}, 5$), devant lequel on mettra un verre rouge, et régler le condenseur de manière



à avoir un faisceau peu divergent. Projeter l'image de l'ouverture sur un écran à main, en plaçant la lentille de projection à une distance un peu inférieure à $2f$ et placer un prisme dans le faisceau, un peu après la lentille.

Lignes focales. — Explorer le faisceau transmis au moyen d'un écran tenu à la main et placé à peu près parallèlement à la face de sortie. Trouve-t-on deux lignes focales? La ligne focale horizontale est-elle à la même distance du prisme que l'objet virtuel? Comment la ligne focale verticale se déplace-t-elle quand on fait tourner le prisme? Obtient-on une image nette pour la position du minimum de déviation?

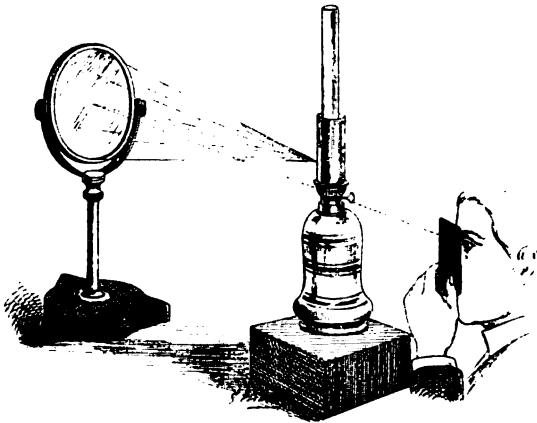
Aplanétisme. — Recommencer ces expériences en mettant le point lumineux au foyer de la lentille de projection et en plaçant une seconde lentille après le prisme, perpendiculairement au faisceau. On constatera que l'on a toujours une image nette et qu'il n'y a plus de lignes focales, quelle que soit l'incidence, c'est-à-dire que le prisme est *aplanétique* pour les points à l'infini.

Image d'une fente. — Revenir ensuite au premier dispositif qui ne comportait qu'une seule lentille, et remplacer la petite ouverture circulaire par une fente verticale. Le prisme étant placé

sous une incidence quelconque, où doit-on placer l'écran pour obtenir une image de la fente? Qu'observe-t-on quand on tourne la fente dans son plan? Si l'on replace la fente verticalement et si l'on retire le verre rouge, on trouve un spectre sur l'écran. Où doit-on placer cet écran pour que les couleurs du spectre soient aussi pures que possible? Les limites horizontales de ce spectre sont-elles nettes en même temps que les couleurs sont pures? Peut-on trouver une position du prisme pour laquelle cette dernière condition soit satisfaite?

— Toutes ces expériences peuvent être répétées utilement sans faire de projections : on regardera à travers le prisme le point lumineux ou son image rejetée à l'infini par la lentille, et l'on notera les apparences observées quand on modifie l'accommodation de l'œil.

48. Défauts d'un miroir. — Entourer le verre d'une lampe à pétrole d'une cheminée en clinquant ($h = 10^{\text{cm}}$) percée d'un trou



d'épingle à la hauteur de la flamme et placer ce point lumineux sur l'axe et un peu plus près du miroir que le centre.

Placer l'œil dans le faisceau réfléchi, soit en arrière, soit en avant de l'image réelle du trou d'épingle et regarder le miroir. On voit alors sur le miroir une région lumineuse ayant un éclat comparable à celui de la flamme et qui suit sur le miroir les mouvements de l'œil dans le faisceau. Quand l'œil atteint l'image, tout le miroir paraît lumineux et cette lumière doit s'éteindre brusquement dès qu'on a suffisamment déplacé l'œil dans un sens ou dans l'autre pour que

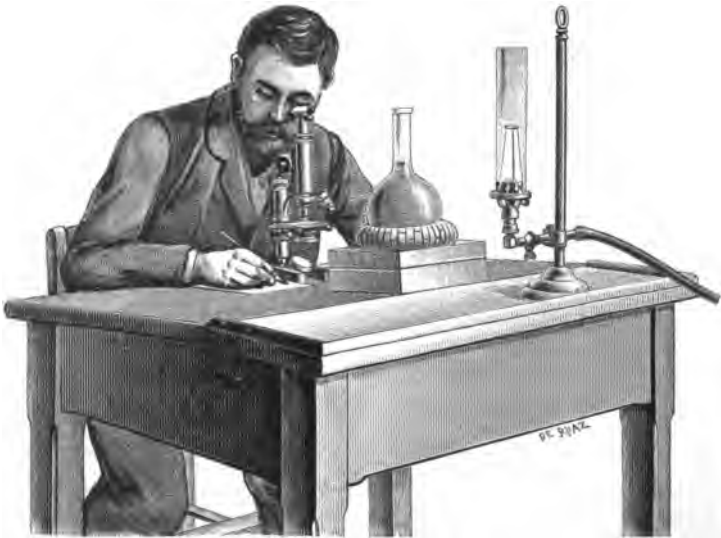
l'image soit venue se faire sur l'iris. En effectuant lentement ces mouvements et les mouvements inverses, les défauts du miroir se révéleront par des résidus de lumière ou par des plages sombres se détachant sur le fond éclairé du miroir.

— On peut aussi mettre l'œil 1^{cm} ou 2^{cm} en arrière de l'image réelle et déplacer une carte dans le plan de cette image : on observera les mêmes apparences (125).

PRINCIPE DES INSTRUMENTS D'OPTIQUE.

49. Projections. — On peut *illustrer* les principes de la formation des images dans les microscopes et les lunettes, ainsi que leur observation par l'œil au moyen d'expériences à très grande échelle faites avec la lanterne et des lentilles de projections. On mettra aisément en évidence, par exemple, ce fait que les microscopes et les lunettes se transforment en instruments de projections pour un tirage suffisant de l'oculaire.

50. Microscope. — On peut se procurer pour un prix peu



élevé des microscopes d'étudiants qui suffisent pour la plupart des observations.

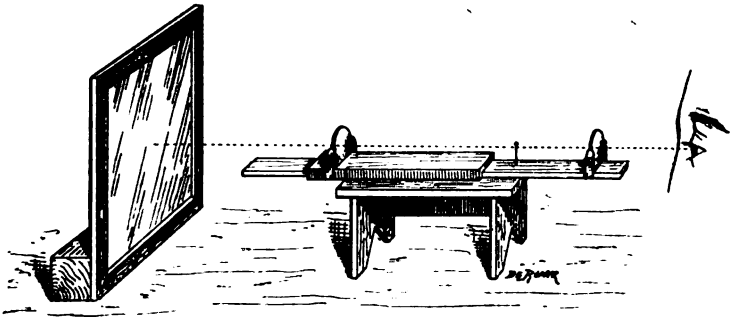
Pour condenser la lumière sur le système éclairé, on emploiera

utilement un ballon plein d'eau contenant une trace de sulfate de cuivre, de manière à obtenir une lumière ne fatiguant pas les yeux.

On devra d'abord s'exercer à mettre au point; on verra que, malgré la faculté d'accommodation de l'œil, la position du microscope est presque exactement déterminée, et que la latitude de mise au point diminue beaucoup quand on emploie les forts grossissements. Par contre, on constatera que cette latitude augmente, mais aux dépens de la clarté, si l'on diaphragme le système éclaircur.

— On dessinera à la chambre claire une préparation microscopique et l'on utilisera cette chambre claire pour la mesure du grossissement. A défaut d'un micromètre on pourra employer pour cette mesure un fragment de fil métallique fin dont on aura déterminé le diamètre avec le palmer, et dont on mesurera le diamètre apparent sous le microscope en se servant de la chambre claire.

51. Lunette astronomique. — *Montage.* — On peut construire une bonne lunette astronomique d'étude en prenant pour objectif et pour oculaire des verres de binocle bruts de 2 et de 8 dioptries. On monte chacun de ces verres à l'extrémité d'une planchette ($75^{\text{cm}} \times 4^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}$ et $50^{\text{cm}} \times 4^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}$). Ce montage

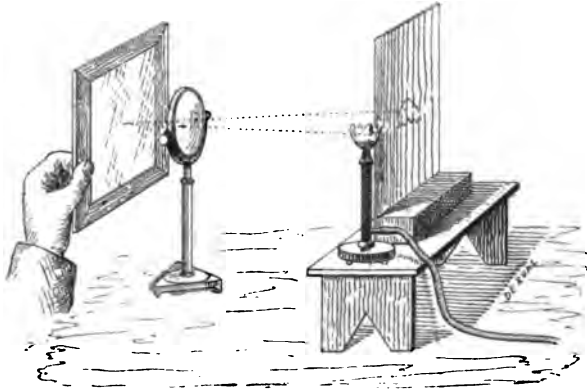


peut se faire en engageant le bord du verre dans un trait de scie pratiqué en travers de la planchette, et en le faisant tenir au moyen de lames de zinc ($7^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}, 5$) ployées en forme de gouttière, clouées contre les côtés des planchettes et formant ressort. On a soin de mettre une cale ($h = 1^{\text{cm}}$) sous le verre porté par la grande planchette pour qu'il se trouve à la hauteur de l'autre. La planchette la plus courte est ensuite munie de joues ($h = 2^{\text{cm}}$) qui lui permettront de glisser le long de la plus grande.

52. Mise au point. — Placer l'œil à l'oculaire et piquer une épingle dans la planchette qui porte cet oculaire, à une distance telle qu'elle soit vue nettement et sans fatigue. Si l'on a la vue normale cette épingle doit se trouver dans le plan focal qui aura pu être déterminé, tout d'abord, en retournant la lunette et en cherchant l'image que l'oculaire donne d'un objet très éloigné.

On visera ensuite un objet quelconque et l'on mettra au point, en s'assurant, par des déplacements de l'œil, que l'image réelle de l'objet est bien dans le même plan que l'épingle. En mettant une feuille de papier dans ce plan, on pourrait vérifier que cette condition de mise au point est effectivement satisfaite.

53. Autocollimation. — Placer la lunette sur un support, en face d'un miroir plan et viser dans la direction de la normale au miroir (*fig. page 77*). On cherchera à apercevoir dans la lunette



l'image de l'épingle, obtenue après une première réfraction par l'objectif suivie d'une réflexion sur le miroir; et l'on réglera le tirage de manière que cette image se fasse dans le plan de l'épingle elle-même.

Regardant alors avec la lunette un objet extrêmement éloigné, on s'assurera que le réglage que l'on vient de faire a eu pour résultat de mettre la lunette au point sur l'infini.

On profitera du réglage de la lunette pour étudier l'effet produit par une lame de glace ou de verre que l'on met devant l'objectif. On constate en général un déplacement de l'image, même pour l'incidence normale, et l'on peut utiliser ce déplacement pour apprécier l'angle que font les deux faces de la lame.

— On peut illustrer le procédé de mise au point par autocollimation, qui vient d'être décrit, en faisant une expérience à grande échelle avec un miroir, une lentille de projection et une lampe dont on projettera l'image de retour sur un écran de carton placé à côté d'elle (*fig. page 78*).

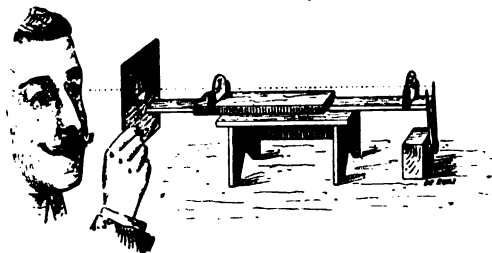
54. Champ et position de l'œil. — Choisir comme objet une grille à barreaux équidistants et déterminer d'abord le diamètre apparent de l'intervalle des barreaux, vus à l'œil nu, soit en mesurant leur écartement et leur distance à l'observateur, soit en mesurant l'écartement des points où ils paraissent se projeter sur un mètre en bois placé parallèlement à la grille à une distance de 1^m de l'œil.

Compter ensuite combien on voit de barreaux à travers la lunette quand l'œil est placé contre l'oculaire, et en déduire la valeur de l'angle de champ. Si l'on éloigne l'œil de l'oculaire, on constatera que le champ qui correspond à une position déterminée de l'œil augmente d'abord pour diminuer ensuite. On mesurera la valeur du champ maximum et l'on s'assurera que ce maximum est obtenu quand l'œil est à l'anneau oculaire. Le champ est-il modifié quand on déplace l'œil à droite et à gauche?

Qu'observe-t-on si l'on masque une partie de l'objectif lorsque l'œil est à l'anneau oculaire?

— On fera l'épure de la marche de la lumière pour rendre compte de tous ces résultats.

55. Grossissement angulaire. Cercle oculaire. — Placer l'œil au cercle oculaire et viser avec la lunette une grille à barreaux



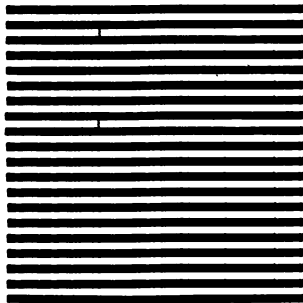
équidistants. Regarder en même temps cette grille avec l'autre œil en s'efforçant d'obtenir la superposition des images : pour y réussir, il est clair que, si l'on n'a pas la vue normale, on doit garder devant les yeux ses verres habituels. Pour avoir le grossissement angulaire

de la lunette, il suffira de compter alors combien un intervalle vu à travers la lunette vaut d'intervalles vus à l'œil nu. Le grossissement angulaire ainsi mesuré est-il égal au rapport des distances focales de l'objectif et de l'oculaire?

— Fixer la lunette sur un support horizontal, éclairer l'objectif et chercher son image à travers l'oculaire. On déterminera le grossissement linéaire de cette image au moyen d'un compas dont on placera les pointes devant l'objectif, pendant qu'on mesurera la distance de leurs images sur un double décimètre, ou bien sur un verre dépoli portant une graduation en millimètres (*fig. page 79*).

Ceci fait, on pourra déplacer les pointes de compas, en avant de l'objectif, et suivre leurs images réelles données par la lunette. Les déplacements linéaires de l'image sont-ils proportionnels à ceux de l'objet? Le grossissement linéaire de cette image est-il toujours égal à l'inverse du grossissement angulaire de la lunette?

56. Pouvoir séparateur. — Placer à plusieurs mètres de distance une mire bien éclairée formée de traits noirs parallèles de 1^{mm} de large séparés par des intervalles blancs de 1^{mm} . Viser avec la



lunette et éloigner cette mire jusqu'à ce que l'on ne puisse plus distinguer les traits et que l'on ne voie plus qu'une teinte plate. Calculer alors le pouvoir séparateur de la lunette.

Il peut se faire que l'on n'ait pas assez de place pour éloigner la mire autant qu'il le faudrait. On peut alors mettre en avant de la mire un verre divergent, de 8 dioptries au moins, qui en donne une image virtuelle, mais réduite, et l'on déplace cette lentille jusqu'à ce qu'on obtienne la teinte plate. On mesure alors le grossissement *angulaire* fourni par la lentille divergente en observant avec la lunette les dimensions de l'objet et celles de l'image, et l'on peut calculer le pouvoir séparateur de la lunette.

— On déterminera aussi l'étendue de l'objectif que l'œil utilise efficacement pour la formation de l'image d'un point. Pour cela, on diaphragmera l'objectif au moyen de diaphragmes de papier noir percés d'ouvertures que l'on prendra de plus en plus petites, jusqu'au moment où l'on arriverait à réduire le pouvoir séparateur.

57. Lunette de Galilée. — Tout le monde a entre les mains deux lunettes de Galilée dans ses jumelles de théâtre. On fera bien, cependant, de construire une lunette de Galilée d'étude comme on a construit une lunette astronomique (**VI, 51**). — On prend encore pour objectif un verre convergent de 2 dioptries, mais l'oculaire est un verre divergent de 8 dioptries. L'appareil est plus court, les planchettes portant l'objectif et l'oculaire n'ont respectivement que 50^{cm} et 40^{cm}.

Avec cet instrument, on fera la mise au point pour différentes distances de l'objet; on cherchera la position de l'œil la plus avantageuse au point de vue du champ; on verra comment on influe sur ce champ en masquant une partie de l'objectif; on mesurera enfin le grossissement et le pouvoir séparateur par les mêmes procédés que pour la lunette astronomique, — et l'on étudiera de la même manière la lunette retournée.

ÉTUDE D'UN OBJECTIF PHOTOGRAPHIQUE.

Avant de faire l'étude d'un objectif photographique dans lequel les défauts sont, en général, très faibles, il sera bon d'étudier une lentille simple de même distance focale (verre pour binocle) que l'on fixera sur la chambre noire à la place de l'objectif, en la faisant tenir par exemple avec de la cire molle.

58. Distance focale. — Adapter un double décimètre sur la glissière de l'appareil photographique, et fixer un index sur le cadre du verre dépoli. — Tracer au crayon sur le verre dépoli une circonférence de quelques centimètres de rayon, en appuyant la pointe sèche du compas sur un petit morceau de papier fort qu'on aura collé au centre de la plaque et qu'on enlèvera ensuite. Tracer aussi une circonférence de même rayon sur une feuille de carton blanc.

Mettre d'abord l'appareil au point sur un objet très éloigné et noter la position du verre dépoli. Mettre ensuite au point sur le

carton que l'on aura placé perpendiculairement à l'axe et à une distance telle que l'image de la circonférence qu'on y a tracée vienne se peindre exactement sur la circonférence égale tracée sur le verre dépoli. La distance focale cherchée est égale à la distance qui sépare les deux positions du verre dépoli.

— On répétera les mesures après avoir retourné l'objectif et l'on vérifiera l'égalité des deux distances focales (211).

59. Angle de champ. — Poser l'appareil sur une table ou sur une planche à dessin, et mettre au point sur le verre dépoli en visant un objet éloigné. Obliquer l'appareil à droite, puis à gauche, jusqu'à ce que l'objet sorte du champ. Dans chacune de ces deux positions, on marque sur la table un trait au crayon le long de la chambre noire, et l'angle de ces deux droites, que l'on mesure ensuite au rapporteur, définit l'angle du champ (211).

60. Volume focal. — Tracer au crayon un quadrillage en centimètres carrés sur le verre dépoli de l'appareil. Mettre au point sur un objet éloigné situé sur l'axe et mesurer la valeur du déplacement du verre dépoli que l'on peut tolérer en avant ou en arrière sans que l'image cesse d'être nette. On déterminera de même les limites de la mise au point pour des points situés de plus en plus près des bords du champ, et l'on aura ainsi, en chaque point, les limites du volume focal.

On se rendra compte ensuite de la manière dont le volume focal augmente quand on diminue l'ouverture du diaphragme (211).

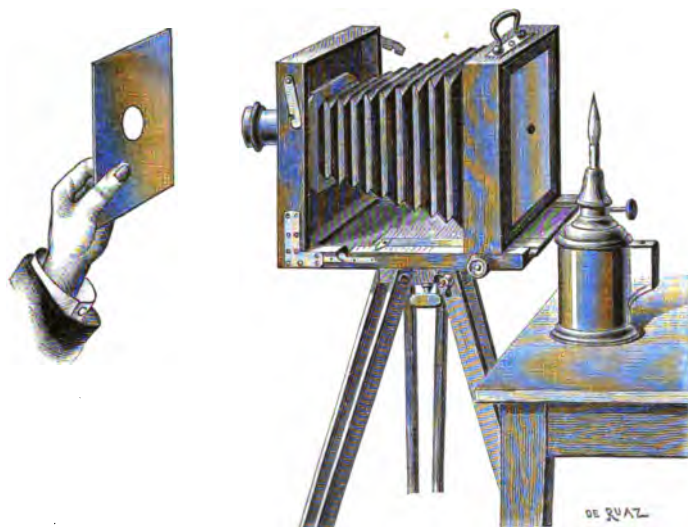
61. Ouverture utile. — Mettre l'appareil au point sur un objet éloigné, puis retirer le verre dépoli et le remplacer par une feuille de carton dans laquelle on aura percé des trous ($d = 0^{\text{cm}}, 2$) au centre et dans les angles.

Placer l'œil derrière l'un de ces trous et regarder à travers l'objectif les pointes d'un compas placées contre l'ouverture et que l'on écartera jusqu'à ce qu'elles arrivent aux limites de l'ouverture utile.

— Au lieu de placer l'œil derrière les trous du carton, on pourra y mettre une lampe, appliquer un verre dépoli contre l'ouverture de l'objectif et dessiner sur ce verre dépoli le contour du faisceau émergent; il indiquera les dimensions de l'ouverture utile.

Avec un bon objectif, on doit trouver sensiblement la même surface d'ouverture utile pour le centre du champ et pour les points les plus éloignés de l'axe (211).

62. Aberration chromatique. — Écrire des caractères sur une longue bande de papier, ou bien prendre la *manchette* d'un journal et la placer en face de l'appareil, mais en l'inclinant à 45° sur l'axe; puis faire une photographie après avoir mis au point sur les caractères qui se trouvent au milieu de la bande de papier. L'examen de la photographie fera connaître, s'il y a lieu, la correction que l'on doit faire subir à la position de la plaque après la mise au point (211).



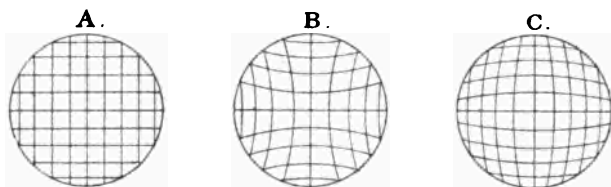
63. Aplanétisme. — Pour s'assurer que l'objectif est suffisamment aplanétique, on fera successivement deux photographies d'un même objet sans changer la mise au point, en utilisant d'abord les rayons centraux, puis les rayons marginaux. Les deux clichés, que l'on développera simultanément, devront avoir la même netteté.

Pour faire cette expérience, le plus simple est de découper au canif, dans une feuille de papier noir, un cercle dont la surface soit égale à la moitié de la surface d'ouverture utile de l'objectif. C'est ce disque de papier et le reste de la feuille de papier noir que l'on emploiera successivement comme diaphragmes pour faire les deux photographies (211).

64. Astigmatisme. Distorsion. — Bien que ces deux défauts aient des origines toutes différentes, on les reconnaîtra par une seule expérience consistant à photographier un objet ayant

des lignes verticales et horizontales accentuées, tel qu'un mur en briques à joints blancs, ou bien un tableau noir sur lequel on aura tracé un quadrillage à la craie.

On verra d'une part s'il n'y a pas d'astigmatisme, c'est-à-dire si



les deux systèmes de lignes sont rendus avec la même netteté et, d'autre part, s'il n'y a pas de distorsion, c'est-à-dire si l'image n'est pas déformée en *croissant* (B) ou en *barillet* (C) (211).

65. Rapidité d'un obturateur instantané. — Préparer l'expérience des flammes manométriques (V, 19) alimentées par



de l'acétylène. Placer l'appareil photographique aussi près que possible du miroir tournant, et mettre au point sur l'image de la flamme.

Pour faire vibrer la flamme manométrique, on prendra dans la bouche le tube de caoutchouc qui sert à recueillir les vibrations, et

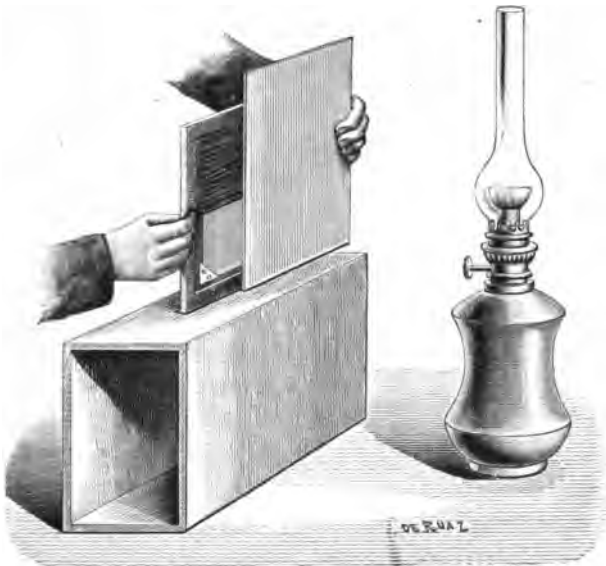
l'on chantera une note déterminée à l'unisson d'un diapason, par exemple, en gardant la bouche fermée, mais la gorge ouverte. On fera alors tourner lentement le miroir et, déclanchant l'obturateur au moment où l'objectif reçoit la lumière, on prendra une photographie instantanée des images successives de la flamme vibrante.

Une fois la plaque développée et fixée, le nombre de dentelures que l'on y apercevra fera connaître le rapport de la durée de l'ouverture du diaphragme à la période connue du diapason.

SENSIBILITÉ DES PLAQUES PHOTOGRAPHIQUES.

66. Limite de sensibilité et solarisation. — Mettre la plaque étudiée dans un châssis et se placer dans une chambre noire, à 5^m d'une bougie.

Tenir devant le châssis une feuille de carton un peu plus grande



et ouvrir partiellement le châssis de manière à découvrir derrière le carton $\frac{1}{8}$ de la hauteur de la plaque.

Mettant ensuite le châssis face à la lumière, démasquer brusquement avec le carton la portion de plaque découverte, laisser la

plaque s'impressionner pendant 32 secondes et replacer le carton. Recommencer l'expérience en découvrant derrière le carton une bande de plaque deux fois plus haute, la laisser s'impressionner 16 secondes, et continuer ainsi, en démasquant successivement des bandes de plus en plus hautes et en réduisant à chaque fois le temps de pose de moitié. L'avant-dernière bande sera ainsi impressionnée pendant une demi-seconde seulement, et une dernière bande témoin ne sera pas impressionnée.

Se rapprocher ensuite à 25^{cm} de la bougie et impressionner une autre plaque de la même manière.

On exposera enfin une troisième plaque à la lumière d'une lampe d'au moins 16 bougies, placée à 25^{cm} de la plaque, en employant des durées de pose variant d'une seconde à plusieurs minutes.

Pour toutes ces expériences, on pourra évaluer le temps en se guidant sur les battements d'un métronome, ou même sur les oscillations d'un pendule à seconde fait d'un objet quelconque suspendu au bout d'une ficelle longue de 99^{cm}.

En développant la première plaque, on trouvera, en général, que les régions qui ont été exposées le moins longtemps à la lumière n'ont rien donné, et l'on pourra déterminer la limite de sensibilité de la plaque.

La seconde donnera un noir d'autant plus accentué que la pose aura été plus longue.

Quant à la troisième, elle sera *solarisée* pour les poses les plus longues, c'est-à-dire que l'excès de lumière aura rendu impossible le développement de l'image, et l'on pourra déterminer la limite de la solarisation.

Il est clair que ces trois expériences pourraient être faites avec la même plaque. On commencerait par les poses les plus longues. Dans la première série, on ne découvrirait qu'un tiers de la longueur des bandes de plaque à impressionner, puis les deux tiers dans la seconde série, et l'on n'impressionnerait les bandes de plaque sur toute leur longueur que dans la série des poses courtes.

67. Sensibilité pour les diverses radiations. — Se mettre dans une chambre obscure, allumer une lampe à acétylène (VI, 2) donnant une flamme verticale (5^{cm} × 0^{cm},5), l'éloigner de 1^m ou 2^m de l'appareil photographique et placer contre l'objectif un prisme qui sera de préférence en flint. Mettre au point sur le spectre en orientant le prisme un peu au delà du minimum de

déviations, et repérer les différentes couleurs par des marques au crayon sur le verre dépoli.

Avant de faire la photographie, on aura soin de placer entre l'appareil et la flamme un écran de carton peint en noir mat ($40^{\text{cm}} \times 40^{\text{cm}}$), assez rapproché pour masquer tout le champ de l'appareil et dans lequel on aura pratiqué une fente verticale d'une largeur égale à l'ouverture utile de l'objectif. On mettra un autre écran noir derrière la flamme en la plaçant obliquement pour éviter



la réflexion de la lumière, et l'on masquera encore le corps de la lampe à acétylène par du papier noir, afin que l'objectif ne puisse voir absolument que la flamme.

Le champ étant ainsi limité, on photographiera le spectre sur une plaque *anti-halo* (VI, 68) avec différentes durées de pose, depuis l'instantané rapide jusqu'aux poses de près d'une minute. Pour passer d'une pose à la suivante, on élèvera la lampe verticalement d'une hauteur un peu supérieure à la longueur de la flamme.

On reconnaîtra ainsi que les plaques ordinaires sont inégalement sensibles aux différentes couleurs du spectre, avec un maximum de sensibilité dans les régions violettes. Si l'on avait obtenu le spectre avec un prisme et une lentille de quartz, on reconnaîtrait dans cette expérience toute l'étendue de la région ultra-violette.

On se rendra compte de la même manière des régions pour lesquelles sont sensibles les plaques dites *orthochromatiques* ou *isochromatiques*.

MANIPULATIONS PHOTOGRAPHIQUES.

68. Anti-halo. — Pour éviter le *halo* qui irradie les images très lumineuses, il suffit de peindre en noir la face postérieure de la plaque avec l'une des compositions que l'on trouve couramment dans le commerce. On peut les remplacer par un enduit fait de noir de fumée incorporé dans de la térébenthine de Venise.

69. Développement au diamidophénol. — Préparer une solution contenant :

Eau	1000 ^g
Sulfite de sodium cristallisé.....	80 ^g

Cette solution se conserve indéfiniment.

Au moment où l'on veut développer une photographie, on verse dans une cuvette la quantité de liquide qui sera nécessaire pour bien couvrir la plaque, et l'on ajoute *un deux-centième en poids* de diamidophénol, qui se dissout rapidement par l'agitation. Ce bain ne peut pas se conserver plus de quelques heures ; mais c'est plutôt un avantage, car l'habitude d'employer un bain développeur toujours neuf évite bien des insuccès.

Le développement doit se faire dans une chambre absolument obscure. On s'éclairera largement en lumière rouge, mais il conviendra de couvrir la cuvette et de n'examiner que de temps en temps la venue du cliché.

L'image doit apparaître au bout d'une vingtaine de secondes. Si elle n'apparaît pas assez vite, on augmente la dose de sulfite. Si le cliché vient trop vite, on le retire, on le lave rapidement, pendant qu'on dilue le bain et qu'on y ajoute du diamidophénol ; puis on reprend le développement. Le développement doit durer plusieurs minutes ; il sera poursuivi, en agitant constamment le bain, jusqu'à ce que les détails principaux de l'image apparaissent quand on regarde la face postérieure du cliché.

Tant que la plaque ne se voile pas, il ne faut pas craindre de pousser le développement. Les clichés obtenus par les débutants sont presque toujours insuffisamment développés.

— Il ne faut pas développer dans l'eau tiède, le développement serait très rapide, mais on risquerait de décoller la pellicule de gélatine. Si l'élévation de la température pouvait faire craindre cet

accident, on serait sûr de l'éviter en traitant le cliché pendant quelques minutes par une solution d'alun à 5 pour 100 (189).

70. Fixage. — Quand le cliché est développé, on le lave dans plusieurs eaux pendant quelques minutes, puis on le met dans le bain de fixage :

Eau.....	1000 ^g
Hyposulfite de sodium.....	150 ^g

et on le laisse séjourner en agitant de temps à autre, jusqu'à ce que tout le bromure soit dissous et qu'on ne voie plus de nuage blanc sur la gélatine.

Il faut éviter de fixer à la lumière du jour : la plaque serait voilée. Il faut aussi éviter absolument que la moindre trace d'hyposulfite ne se mêle aux bains de développement, car on aurait alors des clichés jaunes et tachés.

Si l'on veut que le cliché se conserve, on doit le débarrasser complètement de l'hyposulfite. Dès que le fixage est terminé, on doit donc laver la plaque abondamment, en eau courante si possible, et pendant plusieurs heures.

La plaque est ensuite mise à sécher à l'abri des poussières, la gélatine en dessous, dans un endroit suffisamment aéré pour que le séchage soit complet en 12 ou 24 heures au plus.

Pour des clichés auxquels on ne demande pas de finesse, on peut obtenir un séchage rapide en immergeant la plaque pendant une minute dans de l'alcool, qui s'évaporerait ensuite très vite (189).

71. Renforcement. — On traite le cliché à renforcer par une solution de bichlorure de mercure à *trois pour cent*. Le cliché blanchit. Quand l'action est suffisante, on lave pendant quelques minutes et l'on transporte la plaque dans un bain d'eau ammoniacale à 10 pour 100, qui ramène le cliché au noir. Ces manipulations peuvent se faire en plein jour (189).

72. Affaiblissement. — Mettre le cliché dans un bain d'eau iodée :

Eau.....	1000 ^g
Iodure de potassium.....	10
Iode.....	2,5

Le cliché vire progressivement vers le blanc jaunâtre. Quand on juge l'affaiblissement suffisant, on lave et l'on passe à l'hyposulfite à .15 pour 100, pour dissoudre l'iodure d'argent qui s'est

formé. On peut répéter ces opérations une seconde fois si le cliché est encore trop intense. Ces manipulations peuvent se faire en plein jour (189).

73. Tirage des positifs sur papier. — Nettoyer le dos du cliché avec un linge humecté d'eau ou d'alcool, le placer dans le châssis avec une feuille de papier sensible, et l'exposer à la lumière diffuse. On évitera, en général, l'action directe des rayons du soleil, qui diminue beaucoup les oppositions de teintes et donne une épreuve trop uniforme.

On surveille la venue de l'image en ouvrant de temps en temps la moitié du châssis à une faible lumière. Avec les papiers du commerce dits *au citrate d'argent*, on doit prolonger le développement jusqu'à ce que l'épreuve ait pris une belle teinte brune, plus foncée que celle que l'on veut obtenir définitivement.

L'épreuve est ensuite débarrassée de l'excès de sel d'argent par un lavage à plusieurs eaux, et l'on peut passer au virage quand l'eau de lavage est bien limpide.

Virage et fixage. — On trempe alors le papier dans le bain suivant :

Eau.....	2000 ^g
Chlorure d'or.....	1
Borax.....	30

L'épreuve, qui était devenue rougeâtre par le lavage, devient violacée, de plus en plus foncée. Quand le virage paraît suffisant, on lave et l'on fixe dans une solution d'hyposulfite à 15 pour 100, à laquelle on fera bien d'ajouter 0,5 pour 100 d'alun, autant de bisulfite de sodium, et une trace de nitrate de plomb.

On lave de nouveau et très abondamment, car la moindre trace d'hyposulfite rongerait l'épreuve en peu de temps.

Les amateurs préfèrent souvent réunir le virage et le fixage en une seule opération, qui se fait alors dans un bain préparé suivant les formules suivantes, qui suffisent pour virei-fixer environ 2^{n.º} d'épreuves :

A.		B.	
Eau chaude.....	1000 ^g	Eau.....	100 ^g
Hyposulfite de sodium...	400	Chlorure d'or.....	1
Acide citrique.....	2		
Alun ordinaire.....	20		
Acétate de plomb.....	2		

Laisser reposer la solution A pendant plusieurs heures, puis filtrer.

Pour préparer le bain normal, on ajoute environ 7^{cm³} de B à 100^{cm³} de A. Après le premier lavage, les épreuves sont placées dans le bain mixte, qu'on laisse agir jusqu'à ce que l'épreuve, qui est d'abord devenue très pâle, revienne à un ton un peu plus fort que celui qu'on veut obtenir.

Les papiers sont enfin suspendus pour être séchés, et ils donnent alors des épreuves mates.

Si, cependant, on veut obtenir des épreuves à surface brillante, on les fait sécher en les appliquant contre une lame de verre très propre que l'on a frottée avec un chiffon imprégné d'une solution de spermaceti dans la benzine (189).

74. Papiers au ferroproussié. — On prépare une solution de 30^g de citrate de fer dans 100^g d'eau, que l'on mélange avec une solution de 25^g de ferrocyanure de potassium dans 100^g d'eau, puis on ajoute 50^g d'ammoniaque, et l'on filtre.

Ce bain doit être conservé dans l'obscurité. Les quantités indiquées suffisent pour sensibiliser environ 2^{m²} de papier.

Les épreuves doivent être impressionnées à une forte lumière. On les fixe par un simple lavage à l'eau (158).

PROCÉDÉS AU BICHROMATE ET AU BITUME.

75. Épreuves diapositives de couleur. — Se procurer une *pellicule photographique*, la sensibiliser en la plongeant pendant une minute dans une solution de bichromate d'ammonium à 1 pour 100, en agitant constamment, puis la laisser sécher dans l'obscurité en évitant de la poser à plat pour qu'elle ne se colle pas.

On insole au châssis-pressé comme un papier ordinaire, en mettant la face non bromurée contre le cliché; il faut près d'une minute de plein soleil ou une heure de lumière diffuse pour que l'image apparaisse avec la teinte convenable, qui est d'un brun faible.

On lave à l'eau froide et l'on développe dans de l'eau à environ 40° ou 50°, en arrêtant le dépouillement de l'image avant que les détails ne soient rongés, puis on rince à grande eau.

Pour obtenir une épreuve en couleur, on dissout d'abord le bromure dans de l'hyposulfite, puis on laisse sécher. On plonge ensuite l'épreuve dans une solution aqueuse à $\frac{4}{5}$ pour 100 d'une couleur d'aniline. On prépare ce bain en dissolvant d'abord dans très peu d'alcool la quantité nécessaire d'érythrosine, de bleu de méthylène, de jaune de naphthaline, ou d'un mélange de ces deux derniers corps, selon que l'on veut avoir des épreuves rouges, bleues, jaunes ou vertes.

Ce procédé de teinture permettrait de faire rapidement des verres colorés en utilisant des plaques photographiques de rebut (77).

76. Principe de la phototypie. — Si les pellicules photographiques sont recouvertes de gélatine sur leurs deux faces, les épreuves obtenues dans l'expérience précédente sont *doubles*. Après avoir humecté l'épreuve, on gratte la gélatine du côté qui s'était trouvé tourné vers la lumière au moment où l'on a impressionné la pellicule, puis on trempera de nouveau l'épreuve dans le bain de teinture, on rincera légèrement et l'on séchera incomplètement entre deux feuilles de papier buvard.

Avec une pellicule ainsi préparée, on peut *imprimer* des reproductions, qu'on tire par pression sur un papier quelconque légèrement humecté, comme s'il s'agissait de copier une lettre à la presse. Il est à remarquer cependant que les demi-teintes sont ici très mal rendues, tandis qu'elles viennent bien quand, pour l'impression, on emploie des encres grasses au lieu des teintures aux couleurs d'aniline.

77. Copie d'un réseau de diffraction. — Préparer une solution de gélatine contenant :

Eau	30 ^g
Gélatine dure	1
Bichromate d'ammonium.....	0,15

Cette solution se conserve indéfiniment. Au moment de s'en servir, on la liquéfie au bain-marie tiède, on en verse un peu dans un entonnoir garni d'un petit tampon d'ouate, et l'on reçoit la liqueur, qui filtre presque froide, sur la lame de verre bien plane qui va servir de support. Cette lame est ensuite dressée verticalement, puis abandonnée dans l'obscurité, où elle sèche assez vite et devient sensible en séchant. Avant de se servir de la plaque, on gratte le bourrelet de matière qui s'est formé à la partie inférieure.

Prendre une plaque ainsi préparée, appliquer sur la face sen-

sible soit la face rayée d'un réseau sur verre, soit même un morceau d'étoffe à fils très serrés, telle que de la *soie à bluter* ou du *pongée* du Japon extra-fin, que l'on recouvrira d'une plaque de verre et placera le tout dans un châssis-presse.

On expose 10 secondes *au soleil* en ayant soin de placer le châssis *normalement* à la lumière. A la lumière diffuse, il faudrait une heure de pose et l'on aurait un moins bon résultat.

La plaque est ensuite fixée à l'eau très chaude, puis rincée à l'eau froide; elle porte alors un réseau qui peut remplacer l'original (77).

— Si l'on prépare une plaque comme nous venons de le dire, et si l'on s'en sert pour prendre la copie d'un cliché ordinaire, c'est à peine si l'on apercevra l'image. On peut cependant la rendre visible par réflexion en soufflant dessus de manière à y produire un dépôt de buée, mais on la verra mieux encore en y projetant avec un soufflet le mélange de fleur de soufre et de minium que l'on emploie pour certaines expériences d'électricité (36).

78. Gomme bichromatée. — Dissoudre de la gomme arabique dans son poids d'eau; y verser un volume égal d'une solution à 10 pour 100 de bichromate d'ammonium et ajouter de la couleur pour aquarelle (couleur moite en tubes) de manière à avoir une peinture juste assez peu épaisse pour laisser deviner le grain du papier. On applique cette peinture sur du papier pour lavis de bonne qualité, en se servant d'une brosse en soie de porc, on égalise la couche avec un blaireau fin, puis on suspend les feuilles dans l'obscurité et on laisse sécher.

L'action de la lumière, qui doit être assez longue, se fait *au jugé*, car on ne peut pas voir venir l'image. Pour développer et fixer, il suffit d'immerger l'épreuve dans de l'eau chaude en plaçant la face impressionnée en dessous; cette épreuve se *dépouille* lentement d'elle-même et l'image apparaît bientôt. On peut accélérer le dépouillement et, aussi, atténuer les teintes de certaines parties de l'épreuve en la frottant doucement pendant plus ou moins longtemps avec un blaireau très doux (158).

79. Principe de la photogravure. — Broyer du bitume de Judée dans de l'essence de térébenthine (1), laisser reposer et décanter de manière à obtenir une peinture fluide que l'on filtrera

(1) On obtient de meilleurs résultats en prenant comme dissolvant de la benzine rectifiée, additionnée d'essences de cannelle et de citron et d'un peu de camphre, et en y faisant digérer pendant plusieurs jours du bitume finement broyé (49).

soigneusement. Appliquer sur une plaque de *zinc plané* du commerce, polie au blanc d'Espagne, une couche de cette peinture, juste assez épaisse pour être d'un brun très foncé bien uniforme, puis laisser sécher à l'abri des poussières et dans l'obscurité.

Pour impressionner la plaque, on la met dans un châssis avec le cliché à reproduire et on l'expose longuement à la lumière : il lui faut au moins une heure de plein soleil.

Sous l'action de la lumière, le bitume est devenu insoluble dans l'essence de térébenthine ; la plaque sera donc développée et fixée par immersion dans l'essence. Les dernières traces de bitume soluble seront enlevées en frottant doucement le zinc avec un tampon d'ouate imbibé d'essence.

Pour graver l'épreuve, on recouvre sa face postérieure d'un vernis quelconque et, après séchage, on met le zinc dans une solution d'acide nitrique à 20 pour 100, qu'on évitera de laisser chauffer pour ne pas altérer les vernis protecteurs.

La gravure ainsi obtenue ne rend que les blancs et les noirs. On peut cependant obtenir des demi-teintes si l'on a soin d'interposer un morceau de *mousseline de soie noire* à mailles très fines entre le cliché et la plaque, au moment de l'exposition à la lumière.

— On fait de la gravure sur cuivre par des procédés analogues. La plaque de cuivre est recouverte de gélatine bichromatée (**VI, 77**) qu'on impressionne et qu'on développe à la manière ordinaire. La plaque est ensuite gravée avec du perchlorure de fer (49).

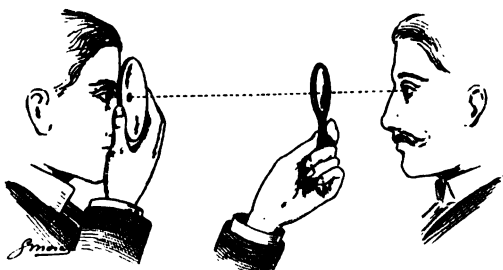
FORMATION DES IMAGES DANS L'ŒIL.

80. Ophtalmoscope. — On se sert pour cette expérience d'une loupe de 4^{cm} à 5^{cm} de distance focale et d'un miroir concave de 20^{cm} à 25^{cm} de distance focale dont on enlève l'argenture au centre sur une largeur de quelques millimètres. A défaut d'un pareil miroir, on peut le remplacer par un verre biconvexe pour binocle, de 1 dioptrie, dont on argente une des faces.

Ayant fait l'obscurité dans la salle, on allume une lumière en arrière du sujet, on se place devant lui à une distance d'environ 50^{cm}, et l'on éclaire l'œil de ce sujet avec le miroir convergent que l'on tient de la main droite. Prenant la loupe de la main gauche, on la mettra à environ 5^{cm} de l'œil étudié et l'on regardera à travers l'ou-

verture que l'on a pratiquée dans l'argenture du miroir : on verra alors se former une image réelle de la rétine en avant de la loupe.

On pourrait voir la rétine du sujet en lui éclairant l'œil simple-



ment avec un miroir plan en *verre platiné* incliné à 45° , et l'on regarderait au travers. Dans ce cas, si le sujet et l'observateur ont la vue normale ou corrigée par des verres et si le sujet regarde dans le miroir un objet à l'infini, l'observateur verra l'image de l'objet sur la rétine aussi nette que les détails de cette rétine; si l'on faisait regarder au sujet un objet peu éloigné, l'observateur devrait placer entre le miroir et son œil un verre divergent d'une longueur focale égale à la distance de l'objet examiné (133).

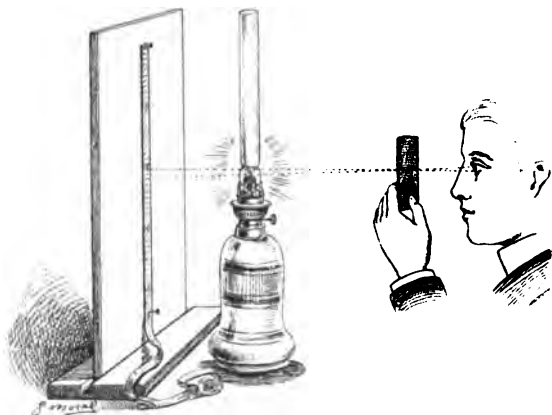


L'examen à l'ophtalmoscope exige de l'opérateur un assez long apprentissage; il ne donne des résultats tout à fait satisfaisants que si l'on a dilaté la pupille du sujet et réduit sa faculté d'accommodation en lui faisant dans l'œil des instillations d'atropine. — On

peut s'exercer à l'emploi de l'ophtalmoscope par des expériences faites sur un œil artificiel (VI, 87).

81. Marche des rayons. — Regarder le ciel à travers un trou d'épingle fait dans une carte de visite que l'on tiendra près de l'œil et placer une tête d'épingle entre l'œil et la petite ouverture éclairée, comme l'indique la figure de la page précédente. Voit-on une image de l'épingle? est-elle droite ou renversée, et comment suit-elle les mouvements de l'objet? (6, 206).

— Percer encore un trou d'épingle dans une carte, se placer à environ 1^m d'un objet très éclairé, tel qu'un mètre en ruban blanc,



et regarder cet objet à travers le trou de la carte qu'on tiendra à environ 10^{cm} de l'œil. Noter le nombre de centimètres que l'on aperçoit. Cette longueur représente-t-elle la projection de l'ouverture de la pupille sur le plan de l'objet?

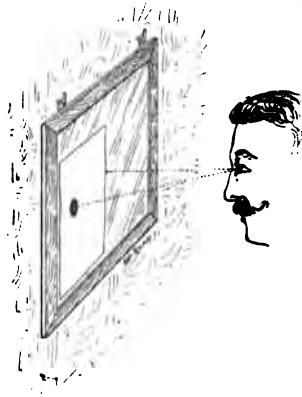
82. Champ de l'œil. — On déterminera le champ en déplaçant un objet à côté de soi et en faisant noter par un aide les limites de la région où cet objet reste vu par l'œil. On reconnaîtra que ce champ comprend toute la portion de l'espace en avant du plan tangent à la surface antérieure de l'œil.

Pour faire cette expérience, on ferme l'un des yeux, et il est nécessaire que la position de l'autre œil soit absolument invariable. On y arrive soit en regardant fixement une lumière, soit en se plaçant en face d'un miroir et en regardant attentivement l'image de l'œil que l'on a laissé ouvert.

83. Région aveugle. — Placer sur un miroir plan une feuille

de papier que l'on fera tenir, par exemple, avec des pains à cacheter. Marquer un point à l'encre sur le bord droit de la feuille et, à 8^{cm} à gauche de ce point, tracer un cercle noir de 1^{cm} de diamètre. Fermer l'œil droit et diriger l'œil gauche de manière qu'il regarde son image dans le miroir et que le rayon visuel passe juste à côté du point marqué sur le bord du papier.

S'éloigner alors progressivement du miroir en continuant à regarder fixement l'image de l'œil, mais en portant son attention sur le cercle noir. A une distance d'environ 25^{cm}, ce cercle noir disparaît pour réapparaître ensuite. Si l'on maintient l'œil à une distance déterminée du miroir, on pourra dessiner sur le papier la région assez étendue pour laquelle l'œil est aveugle.



— Avec un peu de soin, on pourra reconnaître la région aveugle en fixant avec l'œil droit la petite croix blanche de la figure de la page suivante, en plaçant le livre de manière que le disque blanc soit à droite de la croix. Si l'on éloigne alors le livre à environ 25^{cm}, on ne verra plus le cercle blanc.

ACCOMMODATION.

84. Distances de vision distincte, verres correctifs. — Écrire nettement sur une feuille de papier des caractères de grandeurs différentes, variant entre 0^{cm},3 et 3^{cm} et préparer aussi des textes imprimés en caractères aussi fins que possible.

On essaiera de lire tous ces caractères en se plaçant à des distances que l'on fera varier entre quelques centimètres et plusieurs mètres. On notera les distances limites pour lesquelles on peut lire nettement des caractères dont la hauteur est environ 200 fois plus petite que la distance à laquelle ils sont placés.

Si l'œil est normal, il sera intéressant de répéter l'expérience en regardant à travers un verre de 2 dioptries, de manière à rendre l'œil artificiellement myope ou hypermétrope selon l'espèce de verre employé.

S'il y a une distance maxima de vision distincte (*œil myope*),



on reprendra les expériences en regardant à travers un verre divergent d'une longueur focale égale à cette distance maxima de vision distincte, et l'on s'assurera que l'œil, regardant à grande distance, voit alors nettement et sans effort.

On reconnaîtra l'*hypermétropie*, au contraire, à ce que l'on peut encore voir nettement à l'infini quand on met devant l'œil un verre convergent de 1 dioptrie. Pour corriger ce défaut de l'œil, on essayera successivement des verres de plus en plus convergents, et l'on gardera le dernier verre qui permette de voir nettement à grande distance.

Avec ces verres correctifs, l'œil myope ou hypermétrope devra y voir comme un œil normal; la distance minima de vision distincte, notamment, ne devra guère dépasser une quinzaine de centimètres.

Dans le cas contraire, qui est celui de l'œil presbyte (¹), on devra porter des verres convergents supplémentaires que l'on calculera de manière que l'image d'un objet situé à 15^{cm}

ou 20^{cm} se trouve reportée par la lentille à la distance minima de vision distincte de l'œil étudié.

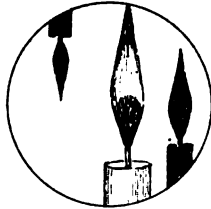
Toutes ces expériences devront être faites successivement avec chacun des deux yeux.

85. Mécanisme de l'accommodation. — Se placer en face et à environ 30^{cm} du sujet, regarder dans son œil gauche, prendre

(¹) La puissance d'accommodation varie avec l'âge. De 12 à 15 dioptries chez l'adolescent, elle descend à 7 ou 8 dioptries chez l'adulte, pour n'être plus que de 1 ou 2 dioptries chez le vieillard dont la presbytie est souvent complète.

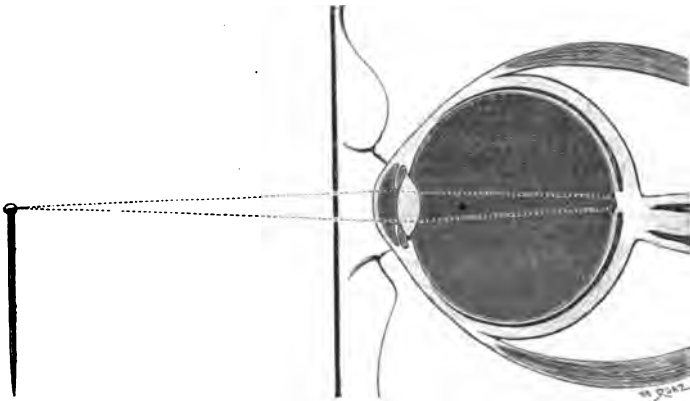
dans la main droite une bougie allumée que l'on tiendra un peu à droite, et examiner les trois images de la bougie que l'on aperçoit dans l'œil du sujet.

Faire regarder au sujet un objet éloigné, puis un objet situé à la distance minima de vision distincte. Quelles sont les modifications que l'on aperçoit dans les images de la bougie? Que peut-on en



conclure relativement aux changements de forme des surfaces réfringentes de l'œil?

86. Œil diaphragmé. — Percer dans une carte de visite deux trous d'aiguille séparés par une distance de 2^{mm} ou 3^{mm}. On mettra cette double ouverture devant l'œil pour regarder une épingle

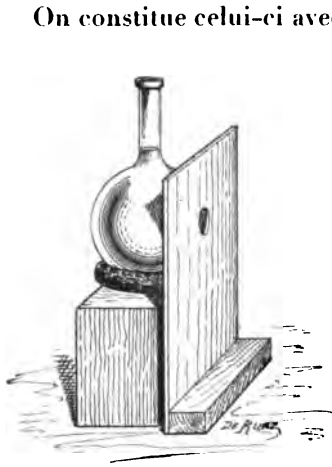


orientée perpendiculairement à la ligne des trous et placée à l'une des distances de vision distincte. On ne verra, naturellement, qu'une seule image de l'épingle.

Rapprocher alors progressivement l'épingle en accommodant l'œil de plus en plus tant que l'on peut obtenir une image nette. Que voit-on lorsqu'on continue à rapprocher l'épingle?

Si l'on regarde la pointe d'épingle à travers un seul trou d'aiguille, la puissance d'accommodation de l'œil semble-t-elle augmenter?

87. Œil artificiel. — Toutes les expériences subjectives sur la marche des rayons, sur l'accommodation et sur les verres correctifs que nous avons décrites, peuvent être illustrées par des expériences semblables faites à une plus grande échelle au moyen d'un œil artificiel.



On constitue celui-ci avec un ballon plein d'eau ($V = 1^l$) placé derrière un écran de carton percé d'une ouverture de 3^m à 4^m à la hauteur du centre du ballon. Si l'on veut figurer l'œil normal, on placera, dans l'ouverture de l'écran, un verre convergent, dont on choisira la convergence (environ 5 dioptries), de manière que l'image d'un objet éloigné vienne se faire au fond du ballon. — On représenterait un œil myope en prenant un verre plus convergent.

Pour la plupart des expériences, on aurait une démonstration suffisante en figurant l'œil au moyen d'une lentille de projection et d'un écran placé en son foyer.

Centre optique. — Pour déterminer le centre optique, on placera deux bougies à une grande distance de l'œil artificiel et l'on mesurera leur distance et la distance de leurs images. On fera ensuite une épure sur laquelle on déterminera le centre de similitude de l'objet et de l'image.

On pourra aussi s'assurer que, si l'on fait tourner l'œil artificiel autour d'un axe vertical passant par le point ainsi déterminé, les images des bougies restent immobiles dans l'espace.

Foyers. — Connaissant le centre optique et les plans principaux qui sont sensiblement confondus avec la première surface réfringente, on déterminera sur l'épure la position du foyer antérieur de l'œil.

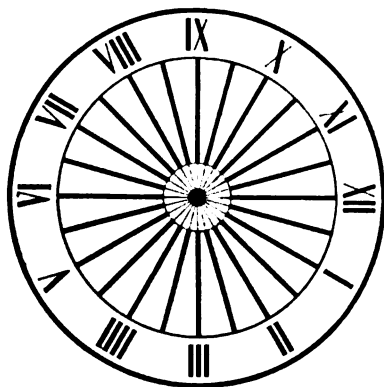
On placera alors un point lumineux, c'est-à-dire une source de lumière très diaphragmée, en avant de l'œil artificiel, à la distance relevée sur l'épure, et l'on constatera que le faisceau qui traverse

le ballon est cylindrique, c'est-à-dire que sa section est la même à l'entrée, et immédiatement à la sortie du ballon.

Ayant ainsi contrôlé expérimentalement la position des deux foyers, on vérifiera encore que le rapport des distances focales principales est égal à l'indice de réfraction de l'eau (58).

IMPERFECTIONS OPTIQUES DE L'OEIL.

88. Astigmatisme. — Sur une feuille de papier blanc, tracer une circonférence ($D = 30^{\text{cm}}$) et 24 rayons régulièrement espacés, figurés par d'épais traits noirs ($e = 0^{\text{cm}}, 4$), que l'on arrêtera à quelque distance du centre, et que l'on pourra numéroté comme un cadran horaire (cadran du D^r Parent).



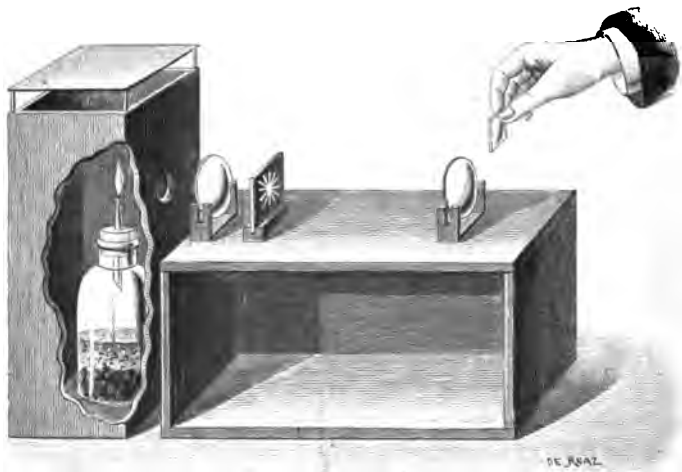
On fait placer le sujet à cinq mètres de ce cadran. Il le regarde avec un œil, puis avec l'autre, en indiquant dans chaque cas quels sont les rayons du cercle qui lui paraissent les plus nets. Naturellement, il doit garder, s'il y a lieu, les verres dont il se sert pour corriger sa myopie ou son hypermétropie.

On met alors devant l'œil étudié un verre cylindrique d'une demi-dioptrie dont les génératrices seront dirigées perpendiculairement au trait qui était vu le plus nettement. Ce trait continue à être vu avec la même netteté, quel que soit le verre que l'on a pris, convergent ou divergent; et l'on choisit le signe de la convergence, de manière que la vision des autres traits soit améliorée. — On essayera ainsi des verres d'une distance focale de plus en plus courte, jusqu'à ce que l'astigmatisme ait disparu.

Les verres ainsi trouvés devront être associés aux verres sphériques qui corrigeaient la myopie ou l'hypermétropie, pour que la correction de la vue soit complète. Pour éviter l'emploi de verres superposés, on calculera un verre plan cylindrique et un verre plan sphérique ayant respectivement même convergence que le verre cylindrique et le verre sphérique choisis, et l'on pourra adopter définitivement le verre sphéro-cylindrique qui proviendrait de l'association de ces deux verres accolés par leurs faces planes.

Il y a très peu de vues qui ne soient pas astigmatiques. Les personnes dont les yeux n'ont pas ce défaut pourront se rendre compte des inconvénients de l'astigmatisme en regardant à travers un binocle muni de verres cylindriques d'une convergence d'environ deux dioptries. Du reste, si l'on regarde de côté en tournant les yeux sans tourner la tête, les yeux subissent des déformations qui les rendent nettement astigmatiques.

89. Imitation de l'astigmatisme. — Coller une feuille de papier d'étain sur une plaque de verre ($8^{\text{cm}} \times 8^{\text{cm}}$), et y découper une étoile en enlevant d'étroites bandes de métal ($e = 0^{\text{cm}}, 1$) avec une pointe d'aiguille ou un canif guidé par une règle plate.



Régler le condenseur de la lanterne de projection de manière à avoir un faisceau à peu près cylindrique; placer l'étoile devant le condenseur, et en projeter l'image sur l'écran.

Si l'on place alors contre la lentille de projection un verre cylindrique convergent de 1 ou 2 dioptries, en ayant soin de ne laisser passer aucune lumière à côté de ce verre, on verra l'image des rayons de l'étoile s'estomper, sauf pour le rayon perpendiculaire aux génératrices du verre cylindrique. Cependant, si l'on coupe ce rayon par une bande de papier ($e = 1^{\text{mm}}$) posée en travers, l'image du rayon privilégié ne s'arrêtera pas nettement, et empiétera sur l'image de la bande de papier. Les deux images auraient été nettement limitées, au contraire, si l'on s'était servi seulement de la lentille sphérique.

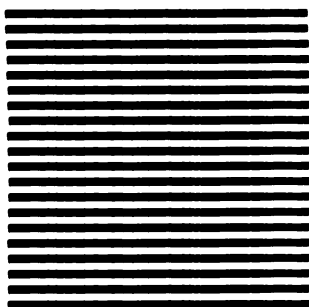
Si l'on déplace une feuille de papier entre l'écran et la lentille pour chercher la position de la seconde ligne focale, on constate que la nouvelle direction privilégiée fait un angle droit avec la précédente.

Correction de l'astigmatisme. — Imitant ensuite la correction de l'astigmatisme de l'œil, on placera devant la lentille astigmatique un verre cylindrique divergent d'une demi-dioptrie ayant ses génératrices perpendiculaires à la direction privilégiée, et l'on constatera que la netteté des images des autres rayons augmente, en même temps que la seconde ligne focale se rapproche. On essaiera ainsi des verres de distance focale de plus en plus courte, jusqu'à ce que la seconde ligne focale soit arrivée à la même distance que la première, et que tous les rayons de l'étoile soient vus avec une égale netteté.

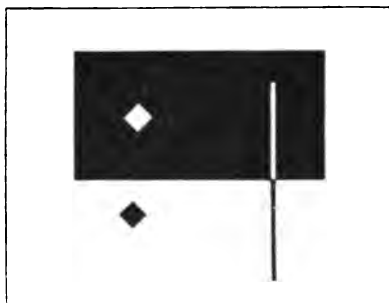
Retirant ensuite ce verre, on le remplacera par un verre cylindrique de même convergence, mais de signe contraire, que l'on placera dans une direction à angle droit de la précédente. On n'aura plus une image nette sur l'écran; l'astigmatisme sera cependant corrigé, mais avec changement d'accommodation, c'est-à-dire que l'on trouvera l'image nette non plus sur l'écran, mais à l'endroit où l'on avait trouvé tout à l'heure la seconde ligne focale (47, 133).

90. Acuité visuelle. — Tracer 10 traits noirs égaux ($l = 4^{\text{cm}}$) de 1^{mm} d'épaisseur, et séparés par des intervalles blancs de même largeur. Fixer ce dessin contre le mur et s'éloigner jusqu'à ce que l'on ne voie plus les traits distinctement, et que l'on aperçoive seulement une teinte plate. Mesurer alors la distance à laquelle on se trouve du dessin, et déduire de cette expérience la valeur de l'angle minimum que l'œil est capable de séparer.

Cette détermination devra être faite successivement sur les deux yeux munis de leurs verres correcteurs.



91. Irradiation. — Dans une bande de papier noir mat ($20^{\text{cm}} \times 10^{\text{cm}}$) couper nettement au canif une ouverture carrée ($2^{\text{cm}} \times 2^{\text{cm}}$) et une fente étroite ($8^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}},5$); puis coller cette



feuille sur un carton blanc en mettant en regard les morceaux détachés du papier noir. En regardant ce dessin sans le fixer avec une très grande attention, l'accommodation devient incertaine, l'irradiation se produit, et les blancs paraissent empiéter sur les noirs.

Cet effet est encore plus marqué si l'on regarde à travers une lentille divergente à court foyer (6 dioptries) placée contre l'œil et qui empêche la mise au point exacte de l'image rétinienne. — L'irradiation disparaît, au contraire, complètement, si l'on éloigne la lentille de l'œil jusqu'à ce que l'on voie nettement l'objet examiné.

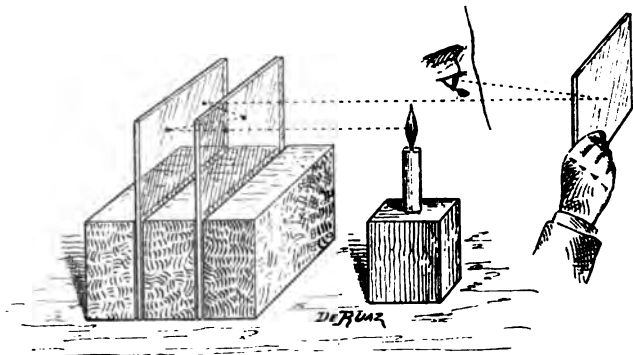
92. Aberrations chromatiques de l'œil. — Fixer contre le mur le tableau des caractères qui servent à reconnaître les limites de la vision distincte (**VI, 84**). Faire l'obscurité dans la

salle et projeter sur ce tableau un spectre, qui doit être bien lumineux, mais qui n'a pas besoin d'être très pur. On reconnaîtra que, si l'œil est normal pour le milieu du spectre, il est généralement myope pour la région violette (47).

— On peut mettre cette propriété en évidence par une expérience encore plus simple. Il suffit de regarder le bord d'une feuille de papier blanc se détachant sur un fond noir, et de glisser contre l'œil une autre feuille de papier formant écran, de manière à masquer une partie de la pupille. Si l'écran se trouve du côté de la feuille de papier que l'on regarde, le bord de cette feuille de papier apparaît irisé en bleu violacé; l'irisation est, au contraire, jaune orangé si l'écran est placé du côté du fond noir.

PROPRIÉTÉS DE LA RÉTINE.

93. Minimum d'éclat perceptible. — Se placer dans une chambre obscure et regarder sur un fond noir une bougie vue par réflexion sur une glace sans tain ($e = 0^{\text{cm}}, 6$). On opérera sous



une incidence peu éloignée de la normale, en garantissant l'œil contre la lumière directe de cette bougie. Combien voit-on d'images de la bougie? Aperçoit-on l'image trois fois réfléchi?

Regarder ensuite la bougie par transparence à travers cette glace. Voit-on l'image deux fois réfléchi?

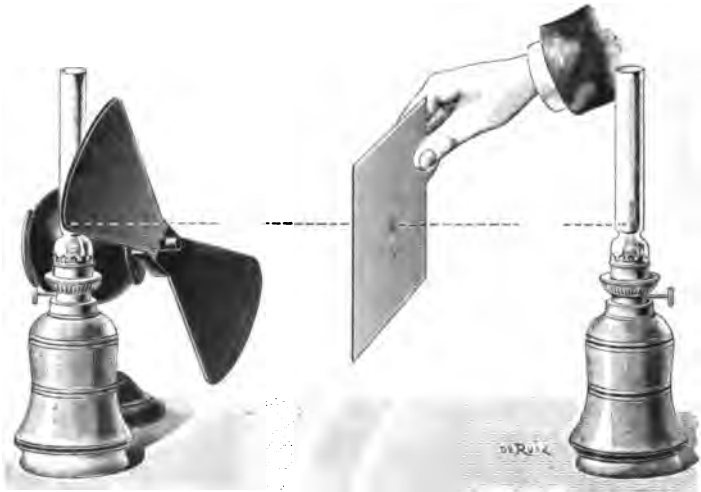
Observer de nouveau par réflexion, en plaçant une seconde glace sans tain derrière la première. Combien voit-on de groupes

d'images de la bougie ? Aperçoit-on le groupe d'images trois fois réfléchi ? Peut-on discerner les composantes de ce groupe ?

Regarder enfin ces groupes d'images par réflexion presque normale sur une troisième lame transparente comme l'indique la figure. Le troisième groupe est-il encore visible, et peut-il être encore dédoublé ?

Quelles sont les limites supérieure et inférieure que chacun de ces essais indique pour le minimum d'éclat nécessaire pour impressionner la rétine ?

94. Persistance et addition des impressions lumineuses. — Découper un disque circulaire ($D = 30^{\text{cm}}$) dans une feuille de carton ($e = 0^{\text{mm}}, 2$) ; tracer 4 rayons perpendiculaires, et entailler le disque de manière à ne laisser subsister que deux



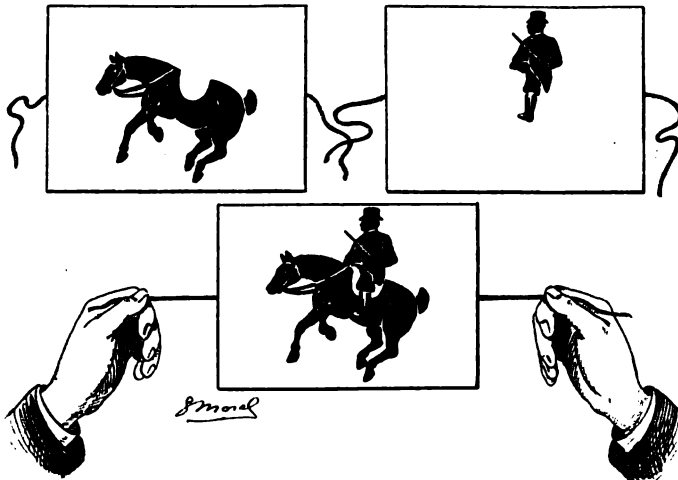
aillettes limitées à ces rayons ($l = 10^{\text{cm}}$). — Clouer le carton ainsi préparé sur une planchette de bois ($8^{\text{cm}} \times 8^{\text{cm}} \times 2^{\text{cm}}$), et le monter sur l'axe d'un moteur de ventilateur, en faisant entrer cet axe dans un trou centré que l'on aura percé dans la planchette.

L'appareil étant placé devant une lampe, on le fera tourner avec une vitesse croissante, pendant qu'on regardera la lampe. A partir de quelle vitesse obtient-on une sensation continue ? L'éclat de la lampe paraît-il plus faible que lorsque le disque était immobile, et cet éclat paraît-il changer quand on augmente encore la vitesse ?

On contrôlera cette expérience qualitative au moyen d'une expérience photométrique, en comparant l'intensité de la lampe



placée derrière le disque tournant à l'intensité d'une autre lampe qui éclairera directement le photomètre; et l'on constatera qu'à



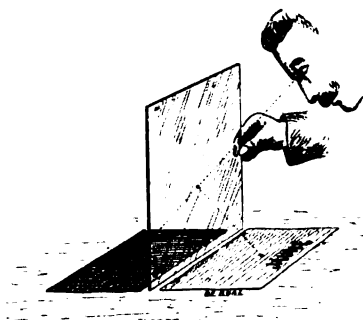
partir d'une certaine vitesse du disque la lampe paraît éclairer comme si son intensité était réduite de moitié.

— La persistance des impressions sur la rétine explique les effets produits par le cinématographe ou par le jouet que représente la figure de la page précédente. — Ce sont les mêmes effets de fusion d'images que l'on obtient quand on fait tourner entre les doigts un carton sur les deux faces duquel on a dessiné des dessins différents : ces dessins paraissent se superposer pendant la rotation.

95. Addition des impressions de couleurs successives.

— Coller des papiers de couleur sur les ailettes du disque de l'expérience précédente, en associant des couleurs très tranchées, telles que rouge et vert, ou bleu violacé et jaune. — Quand le disque tourne suffisamment vite, on ne voit plus qu'une teinte uniforme; et cette teinte est identique à celle que l'on obtiendrait en envoyant simultanément dans l'œil les deux lumières colorées.

Pour démontrer cette dernière proposition, on mettra côte à côte, sur la table, deux échantillons des papiers de couleur employés

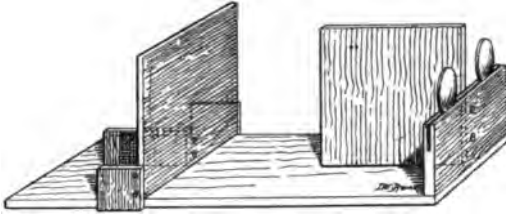


en les faisant se détacher sur un fond noir, et l'on placera une glace sans tain verticalement, entre les deux. Si l'on dirige le regard sur la glace, deux faisceaux colorés superposés arrivent à l'œil, l'un par transmission, l'autre par réflexion. En faisant varier l'incidence, on fera varier les proportions relatives des deux couleurs; et, pour une incidence convenable, on retrouvera exactement la teinte que l'on a observée sur le disque tournant.

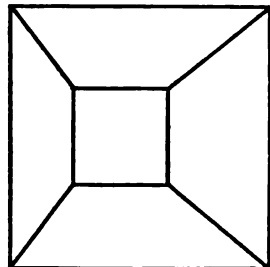
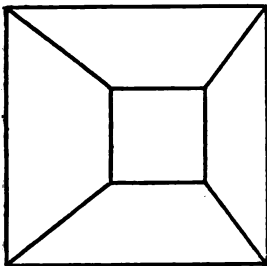
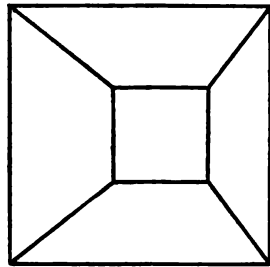
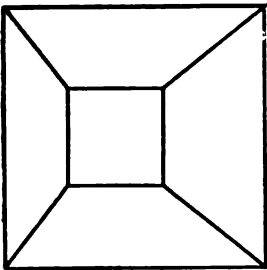
96. Relief. Stéréoscope. — On peut réaliser simplement un stéréoscope avec deux verres convergents de 5 dioptries. On les fera tenir dans une rainure ($0^{\text{cm}}, 15 \times 2^{\text{cm}} \times 12^{\text{cm}}$) pratiquée dans l'épaisseur d'une planchette de sapin ($12^{\text{cm}} \times 5^{\text{cm}}$) fixée à l'extrémité d'une autre planchette plus longue ($12^{\text{cm}} \times 30^{\text{cm}}$). Une cloison verticale, que l'on peut peindre en noir ($10^{\text{cm}} \times 10^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}$),

sépare les champs de vision des deux yeux, et l'épreuve stéréoscopique est appliquée contre une dernière planchette, que l'on peut éloigner plus ou moins des deux oculaires pour la mise au point.

Les deux oculaires étant séparés par une distance égale à l'écar-



tement des yeux ($6^{\text{cm}}, 5$). la fusion des images et la sensation de relief s'obtiendront en modifiant l'écartement des deux parties de l'épreuve stéréoscopique. Si cet écartement était invariable, on agirait au contraire sur la distance des oculaires.



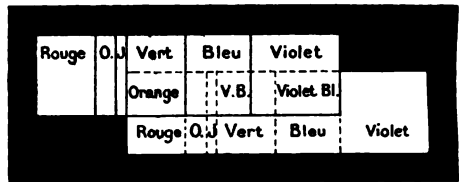
On examinera les différences que présentent les deux images; on observera en outre le renversement de relief qui se produit quand on permute l'image droite et l'image gauche. Ces deux

observations se font très nettement, par exemple avec les dessins ci-dessus (77).

Si l'on colorie les épreuves en employant des couleurs complémentaires pour les parties correspondantes des deux images, on obtiendra dans l'observation stéréoscopique un mélange subjectif des sensations colorées et l'image en relief paraîtra blanche.

97. Sensation de couleur, couleurs complémentaires. — Sans entrer dans l'étude détaillée des différentes sensations de couleurs qu'on attribue souvent à la superposition de trois sensations primordiales (rouge, vert et violet; ou rouge, jaune et bleu), nous indiquerons seulement l'expérience de Helmholtz montrant que le mélange de deux radiations simples peut produire la sensation de blanc.

On découpe dans du papier noir une double fente disposée comme l'indique la figure, on l'éclaire par derrière et on la regarde



à travers un prisme. On aperçoit alors deux spectres qui se superposent en partie, et l'on peut combiner à volonté les couleurs des deux spectres en modifiant l'écartement des deux fentes. On obtiendra, par exemple, la sensation de blanc par la superposition du jaune et du bleu (209).

98. Fatigue de la rétine. Contraste des couleurs. — Mettre sur un miroir plan un morceau de papier blanc (5^{cm} × 5^{cm}) sur lequel on aura tracé de gros caractères noirs. Marquer un point sur le bord de ce papier et regarder dans le miroir avec un seul œil, en fixant l'image de cet œil de manière que le rayon visuel passe juste à côté de la marque que l'on vient de faire.

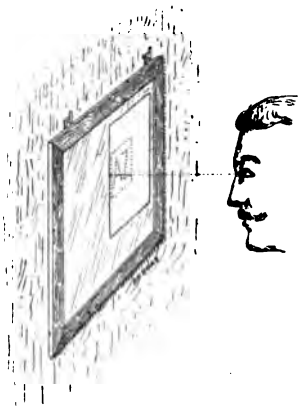
On aura soin de se placer près d'une fenêtre, de manière que le papier blanc soit violemment éclairé, mais on dirigera le miroir de façon qu'il ne réfléchisse qu'un fond obscur.

On laissera la rétine s'impressionner pendant plusieurs secondes dans la position indiquée.

Pour révéler l'image rétinienne, il suffit d'éclairer la rétine par une lumière modérée. On pourra, par exemple, recouvrir brusquement les caractères noirs que l'on vient de regarder avec une feuille de papier blanc plus grande que la première et qui la recouvre tout entière. En continuant à regarder dans la même direction, la lumière réagissante fera apparaître une image négative du carré de papier et des caractères qui s'y trouvaient tracés. Si l'on a impressionné l'œil avec un papier de couleur, l'image négative apparaît avec la teinte complémentaire.

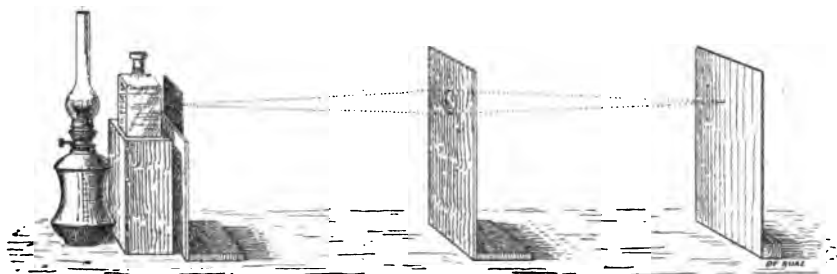
— Si l'impression a été très violente, si, par exemple, l'expérience a été faite à la lumière directe du soleil, l'œil emporte une image qui se conserve pendant plusieurs minutes en changeant progressivement de teinte.

On peut étudier cette image *les yeux fermés* au moyen de la lumière qui traverse les paupières, lumière que l'on devra intercepter par moments en mettant les mains devant les yeux.



DISPERSION : ACHROMATISME.

99. Aberrations chromatiques des lentilles. — Disposer sur la table une lampe, un écran opaque où l'on a pratiqué un trou



de $0^{\text{cm}},2$ de diamètre, puis un verre de binocle convergent ($f = 25^{\text{cm}}$), monté dans un support, et enfin un écran blanc.

Entre la lampe et le premier écran, placer un flacon contenant

une solution de sulfate de cuivre et projeter sur l'écran une image du trou à peu près égale à l'objet. Marquer alors la place de l'écran où se trouve l'image et remplacer le sulfate de cuivre par de l'encre rouge, ou par un verre rouge. On constatera que l'image n'est plus au point et qu'on doit reculer l'écran pour retrouver une image nette. Ce déplacement du foyer disparaît-il quand on diaphragme la lentille?

Opérer ensuite en lumière blanche et placer l'écran dans les deux positions qu'il vient d'occuper. Quelles irisations observe-t-on? Ces irisations diminuent-elles quand on diaphragme la lentille?

— Si l'on a à sa disposition une grande lentille convergente en *flint*, c'est-à-dire en verre très dispersif et dont les aberrations chromatiques seront par conséquent considérables, on répétera les expériences précédentes en se servant de la lanterne de projection. On aura alors des colorations brutales qui pourront être montrées à un auditoire et qui seront particulièrement frappantes si l'on place contre la lentille un diaphragme annulaire qui ne laisse passer que les rayons marginaux.

100. Achromatisme d'une lunette. — Remplacer la lentille simple des expériences précédentes par un objectif de jumelle et opérer en lumière blanche. L'objectif est-il absolument achromatique? Les irisations sont-elles suffisamment supprimées en diaphragmant l'objectif de manière à ne laisser libre qu'une surface égale à celle qui est réellement utilisée quand on se sert de la lunette?

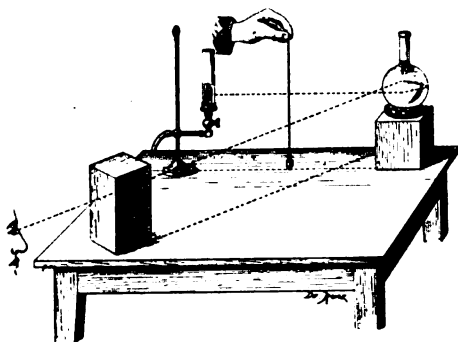
Remonter ensuite la lunette et viser un trait de craie tracé sur le tableau noir, en ayant soin que l'œil soit bien centré; puis déplacer la lunette de manière que les points visés arrivent aux limites du champ. L'image est-elle toujours achromatique?

101. Achromatisme des prismes. — Si l'on dispose d'un prisme de flint, d'un angle de quelques degrés, on complétera cette étude de l'achromatisme en combinant ce prisme avec un ou plusieurs prismes en crown ayant des angles de 1° , 2° , 4° , 8° ou 16° (verres prismatiques pour binocles) et l'on regardera un trait blanc sur fond noir au moyen du prisme mixte.

On cherchera par des tâtonnements méthodiques, semblables à ceux d'une pesée, les deux combinaisons qui donnent soit la déviation sans dispersion (achromatisme), soit, au contraire, la dispersion sans déviation (prisme à vision directe).

DISPERSION : ARC-EN-CIEL.

102. Rayons efficaces. — Remplir d'eau un ballon de verre ($V = 500^{\text{cm}^3}$), le poser au-dessus du coin d'une grande table, sur un support assez élevé pour qu'on puisse aisément mettre l'œil à la



hauteur du ballon. Poser aussi une lampe à la même hauteur, mais à l'autre bout de la table.

Dessiner d'abord un diagramme général de la marche de la lumière pour reconnaître plus facilement, parmi les images que l'on aperçoit dans le ballon, quelles sont celles qui proviennent d'une réflexion intérieure ou de deux réflexions intérieures.

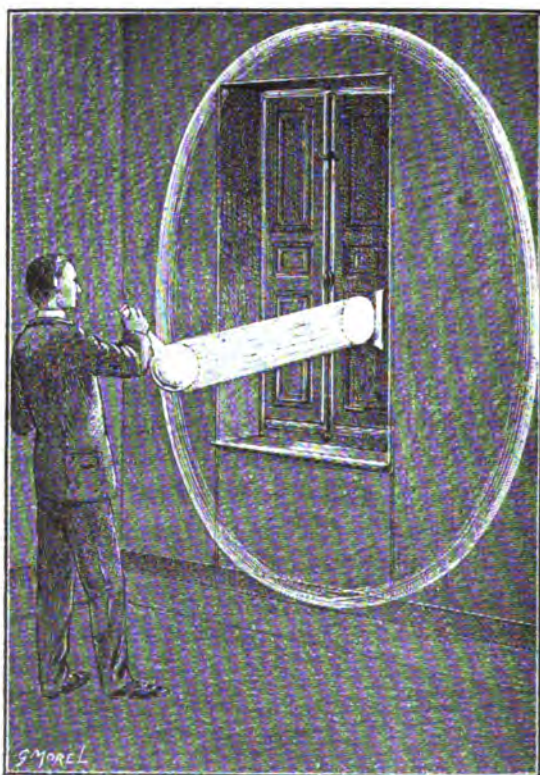
Choisir ensuite l'un des rayons transmis, commencer à étudier sa marche au voisinage de l'incidence normale, et suivre les variations continues de ce rayon à mesure qu'il s'éloigne de l'axe. On pourra, de temps en temps, déterminer la position du point d'incidence correspondant en cherchant contre quel endroit du ballon il faut mettre un petit objet opaque, un crayon, par exemple, pour masquer la lumière du rayon que l'on examine. — On constatera ainsi l'existence du maximum de déviation (rayons efficaces) et le dédoublement des images qui en résulte.

Ayant placé l'œil de manière à recevoir le rayon le plus dévié, on marquera à la craie la projection de ce rayon sur la table. On matérialisera le plan projetant au moyen, par exemple, de l'une des faces d'une caisse en bois que l'on aura amenée à se trouver juste dans la direction de la ligne de visée. Au moyen d'un fil à plomb, on projettera aussi sur la table le rayon que l'on étudie, et que l'on définira par son point d'incidence et par le milieu de la source de

lumière. — L'angle des deux droites tracées sur la table est l'angle de déviation maxima. Pour la lumière rouge il doit être de 42° ou de 51° , selon que le rayon a subi une ou deux réflexions intérieures (66, 100, 118).

103. Projections. — Si, dans l'expérience précédente, on reçoit les rayons émergents sur un écran blanc situé à très petite distance du ballon, on peut voir le premier arc-en-ciel se peindre, assez pâle, à la limite du faisceau, mais le second arc n'est guère visible.

L'expérience devient au contraire assez brillante si l'on dispose



de la lumière du soleil ou même de la lumière électrique pourvu que l'on emploie un ballon *très propre* et contenant de l'eau *filtrée*. On fait l'obscurité dans la salle et on y laisse entrer un faisceau solaire horizontal par une ouverture pratiquée dans le volet et au

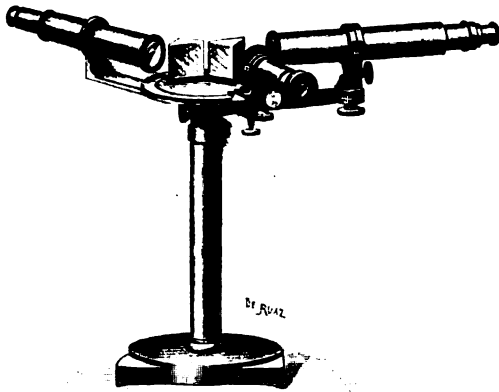
moins aussi large que le ballon dont on se sert ($V = 1'$). En plaçant le ballon dans le faisceau de lumière à 1^m ou 2^m de l'ouverture, on verra un grand arc-en-ciel se peindre sur le mur et l'on pourra apercevoir l'arc-en-ciel de second ordre.

Si l'on opère à petite distance (50^{cm}), les deux arcs sont bien plus lumineux, mais le second arc étant nécessairement déplacé, par rapport au premier, de toute l'épaisseur du ballon, il pourra arriver qu'il soit vu à l'intérieur du premier ou même qu'il soit trop près de lui pour en être distingué.

SPECTROSCOPIE : SPECTRES D'ÉMISSION.

104. Réglage et graduation du spectroscopie. — Les expériences qualitatives de spectroscopie se font aisément avec un spectroscopie de poche à vision directe que l'on peut se procurer à peu de frais.

Si l'on emploie un spectroscopie plus important, le réglage com-



porte les opérations suivantes. — Retirer la lunette d'observation, viser un objet éloigné à travers la fenêtre *ouverte* et marquer le tirage de l'oculaire. — Éclairer la fente du collimateur en lumière blanche, regarder *directement* dans ce collimateur avec la lunette pour le régler aussi sur l'infini et opérer de la même manière pour mettre l'échelle micrométrique au foyer de sa lentille. — Orienter la lunette de manière à avoir le milieu du spectre dans le champ,

puis la déplacer parallèlement à elle-même jusqu'à ce qu'on ait le maximum de lumière.

Pour régler l'échelle micrométrique, on tourne ou on transporte le tube qui la porte de façon que son prolongement rencontre la face réfléchissante au même endroit que le prolongement du tube de la lunette et que ces tubes semblent également inclinés sur le prisme. Éclairant ensuite le collimateur avec une flamme de sodium ⁽¹⁾ et regardant dans la lunette on tourne le tube qui porte l'échelle jusqu'à ce qu'un trait déterminé de cette échelle se trouve sur la raie D, puis on agit par translation de manière à obtenir un bon éclaircissement.

— Pour étudier le spectre d'un métal, on placera un bec Bunsen derrière la fente du spectroscopie, en le réglant de manière à admettre le maximum d'air dans la flamme. On trempera un fil de platine, ou un morceau de papier-filtre, dans une solution du chlorure de ce métal et l'on placera le fil de platine dans la flamme.

On pourra observer ainsi les spectres du sodium, du potassium, du baryum, du lithium, du thallium. Ils suffiront pour construire la courbe des longueurs d'onde en fonction des lectures faites sur l'échelle micrométrique. On se servira ensuite de cette courbe pour reconnaître la composition qualitative d'un mélange salin de composition inconnue tel qu'un *feu de bengale* rouge ou vert.

La partie ultraviolette du spectre s'observe avec des prismes de quartz et un oculaire fluorescent en verre d'urane.

— On ne saurait trop recommander de compléter cette étude en faisant une expérience à grande échelle avec la lanterne et des lentilles de projection, pour illustrer la marche de la lumière et la formation des images dans le spectroscopie.

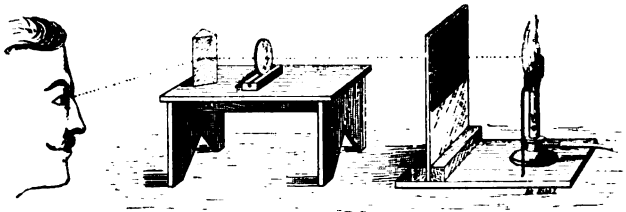
105. Expériences spectroscopiques avec un simple prisme. — *Montage.* — Coller une feuille de papier d'étain ($10^{\text{cm}} \times 10^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}},001$) sur une lame de verre ($10^{\text{cm}} \times 20^{\text{cm}}$) en se servant d'un enduit quelconque employé en très petite quantité, et y pratiquer au canif une fente étroite ($5^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}},05$). Monter la lame de verre verticalement sur un support en bois formé, par exemple, d'une planchette horizontale ($15^{\text{cm}} \times 10^{\text{cm}} \times 2^{\text{cm}}$) et de deux tasseaux ($10^{\text{cm}} \times 2^{\text{cm}} \times 2^{\text{cm}}$) formant rainure.

(1) Pour les expériences qui ne demandent pas beaucoup de lumière, on peut se contenter de mettre le bout d'une baguette de verre dans la flamme d'un bec Bunsen. Le verre se ramollit et la flamme se colore en jaune.

Cette fente pourra être éclairée par derrière au moyen d'un bec Bunsen qu'on posera sur la planchette.

À défaut de toile de platine, découper un morceau de toile métallique en fils de fer ($5^{\text{cm}} \times 2^{\text{cm}}$), le replier en forme de coupelle et piquer dans cette coupelle l'extrémité d'une tige métallique ($d = 0^{\text{cm}}, 2$; $l = 20^{\text{cm}}$) courbée à angle droit; puis fixer cette tige dans un trou de poinçon pratiqué dans la planche qui forme le support de l'appareil. — À environ 25^{cm} en avant, disposer enfin un support ($h = 12^{\text{cm}}$) sur lequel on placera un prisme de verre ($h = 6^{\text{cm}}$; $a = 2^{\text{cm}}$) et une lentille convergente de 5 dioptries.

Expériences. — Mettre un fragment de chlorure de sodium fondu dans la coupelle de fil de fer, placer cette coupelle dans la flamme du bec Bunsen, en avant et près de la base, et ouvrir largement l'orifice d'entrée de l'air. Disposer la fente devant la partie brillante de la flamme, placer la lentille en avant à une distance juste égale à sa distance focale, mettre le prisme contre la lentille et observer l'image de la fente à travers la lentille et le prisme.

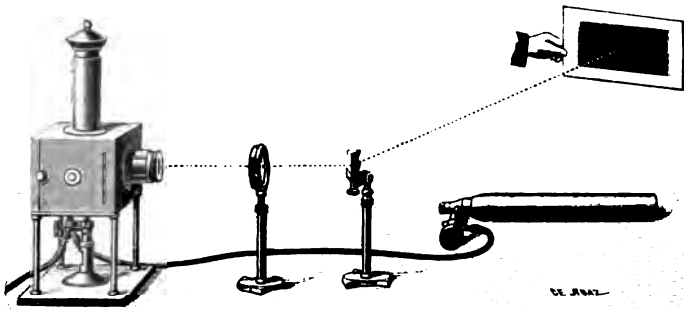


On constatera que cette image conserve la même netteté depuis l'incidence rasante jusqu'à l'émergence rasante où l'image s'élargit sensiblement. — On pourra se rendre compte aussi des apparences que présenterait cette image pour les différentes incidences si l'on supprimait la lentille et l'on verra que l'on peut réellement supprimer cette lentille pour une position convenable du prisme.

Sans rien changer au système optique, on pourra retirer la coupelle de chlorure de sodium et placer dans la flamme un fil de platine ou un fragment de toile métallique humectée de chlorure de lithium. On constatera alors que la nouvelle image a la même netteté que la précédente, mais qu'elle est moins déviée, quelle que soit d'ailleurs l'incidence. La comparaison des deux images se fait, du reste, sans difficulté, par suite de la présence à peu près inévitable d'une trace de sodium qui fait que les deux lumières coexistent.

On étudiera de même les spectres plus complexes que fournissent le chlorure de baryum et le chlorure de cuivre, et le spectre continu de la flamme blanche que donne le bec Bunsen quand on y supprime tout appel d'air (173, 202).

106. Projection d'un spectre. — Mettre une fente de largeur réglable devant la lanterne de projection, placer le condenseur de manière à avoir un faisceau légèrement divergent, et projeter une image réelle de la fente sur un écran blanc. — Interposer ensuite le prisme à l'endroit où le faisceau se rétrécit pour donner l'image de la source de lumière, c'est-à-dire vers le foyer de la lentille, et transporter l'écran dans le faisceau dévié.



La projection étant d'abord faite à faible distance, on étudiera les variations d'aspect du spectre et sa mise au point pour les différentes incidences, et l'on se rendra compte de la nécessité d'opérer au minimum de déviation. C'est, du reste, sous cette incidence que l'on opère naturellement quand on emploie un prisme à vision directe.

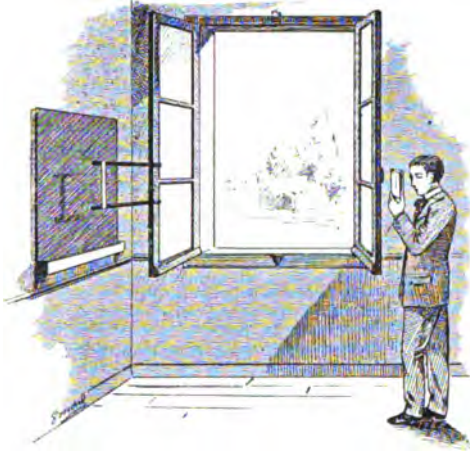
Si l'on veut étudier les spectres des différentes parties de la source, on devra mettre la fente sur un support indépendant et reculer la lanterne, dont on enlèvera le condenseur. Avec une lentille auxiliaire, on projettera alors sur la fente une image réelle de la source et chacun des points de l'image donnera sur l'écran le spectre linéaire du point correspondant de la source.

— Pour projeter les spectres des métaux, on placera dans la lanterne un chalumeau oxyhydrique, dans la flamme duquel on mettra un morceau de *fusain* imprégné de la solution saline étudiée.

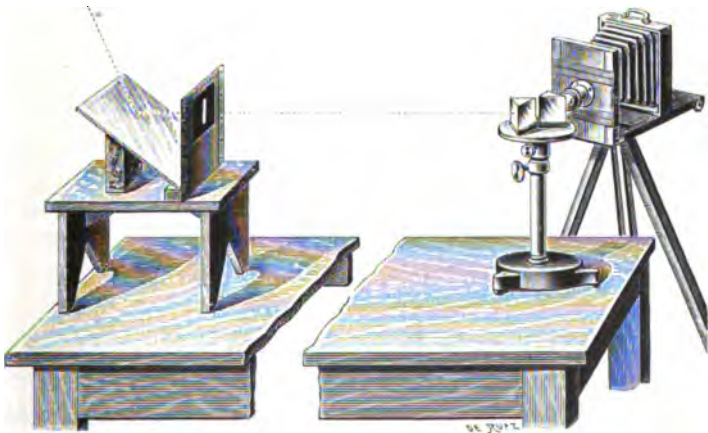
Si l'on se sert d'un arc électrique, on pourra employer de gros charbons ($D = 1\text{ cm}, 2$), le charbon positif en bas, et placer dans

le *cratère* un fragment de métal. On pourra aussi prendre des charbons préparés par l'industrie pour les *arcs à flamme éclairante*, charbons qui contiennent des composés métalliques (Ca et Na; Sr; Ba et K) (145 bis).

107. Spectre solaire. — On fait la projection du spectre



solaire avec une fente relativement fine. Pour que les raies soient nettes, on ne doit guère dépasser, comme largeur de fente, $\frac{1}{500}$ de la distance focale de la lentille collimatrice.



On observera aussi le spectre solaire avec le spectroscopé. On s'assurera de l'invariabilité de la position des raies noires, de

quelque manière que la lumière du soleil arrive au spectroscope, soit qu'on emploie les rayons solaires directs ou la lumière tamisée à travers un verre de couleur ou un liquide coloré, soit qu'on ne reçoive que de la lumière diffusée par le ciel, par une feuille de papier blanc ou même par du papier de couleur.

— On observera encore les raies du spectre solaire à l'œil nu, à travers un simple prisme. On prendra pour cela, comme source de lumière, une bande de papier blanc, large de $0^{\text{cm}},3$, qu'on suspendra de manière qu'elle soit directement éclairée par le soleil, mais qu'elle se projette sur un fond noir placé dans l'ombre (*fig. page 119*), et l'on examinera cette bande de papier au travers d'un prisme de verre tenu à la main, en se plaçant à une distance d'au moins 150^{cm} . — On pourrait aussi se servir, comme ligne lumineuse, d'une aiguille à tricoter bien polie ($d = 0^{\text{cm}},1$), avec laquelle on pourrait se contenter de renvoyer vers l'observateur la lumière diffusée par le ciel (125).

108. Photographie d'un spectre. —

On obtient de bons résultats en prenant comme source de lumière une fente large de $0^{\text{cm}},2$ située à 2^{m} de l'appareil. On pourra découper cette fente au canif dans du papier noir collé sur une plaque de verre et l'on fixera cette plaque de verre contre un écran de carton vertical percé d'une ouverture convenable et qui servira à encadrer la fente d'un fond noir. — La fente sera éclairée par derrière au moyen d'un miroir qui réfléchira, par exemple, la lumière du ciel.

L'appareil photographique ayant été d'abord mis au point sur la fente, on placera le prisme du spectroscope contre l'objectif, en orientant le prisme et l'appareil de manière

à amener le spectre au milieu du champ pour le minimum de



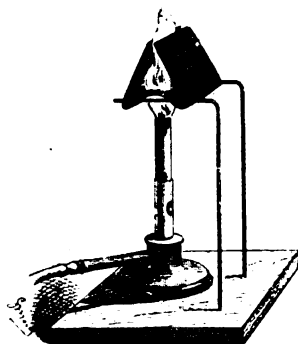
déviations. — On pourra utiliser une image parasite pour repérer la position des couleurs du spectre sur la plaque.

Le temps de pose sera de l'ordre de grandeur de la seconde ; il dépendra naturellement de l'éclat du ciel et de la rapidité des plaques. — Il n'y a pas d'intérêt à employer la lumière directe du soleil, avec laquelle on serait obligé d'employer une fente très étroite, un objectif très diaphragmé et une pose instantanée très courte. Au contraire, on devra prendre les précautions habituelles contre le *halo*, et les plaques seront peu poussées au développement pour que l'image des raies du spectre ne soit pas envahie par l'image des parties brillantes.

SPECTROSCOPIE : SPECTRES D'ABSORPTION.

109. La vapeur de sodium absorbe les radiations qu'elle émet. — On obtient des résultats très nets avec une flamme qui a traversé une toile métallique. On donne à la toile la forme d'une gouttière renversée ($l = 7^{\text{cm}}$; $d = 5^{\text{cm}}$) surmontée de deux faces formant cheminée ($5^{\text{cm}} \times 5^{\text{cm}}$), et l'on monte cette toile métallique sur deux fils de fer ($d = 0^{\text{cm}}, 2$) pliés à angle droit et fixés dans une planchette ($7^{\text{cm}} \times 7^{\text{cm}} \times 2^{\text{cm}}$).

Ce petit appareil est placé dans la flamme d'un bec Bunsen, au sommet du petit cône bleu qui se forme quand on permet le maximum d'appel d'air, et l'on dépose quelques grains de chlorure de sodium fondu sur la toile métallique. La flamme est alors très brillante en dessous de la toile métallique, tandis qu'elle est peu lumineuse, mais très absorbante, dans toute sa partie supérieure.

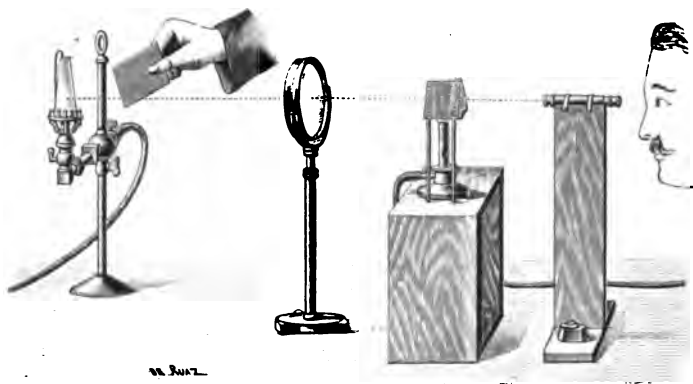


Si l'on allume une flamme sodée ordinaire et si on la regarde à travers la flamme absorbante, toute la lumière jaune est éteinte et la première flamme n'apparaît plus qu'avec une teinte violacée. De même, si l'on regarde à travers la flamme absorbante un fond blanc éclairé par la flamme sodée brillante, la portion du fond que l'on verra par transparence semblera ne pas être éclairée.

110. Spectres d'absorption. — Placer une lampe à pétrole à 2^m environ d'un spectroscopie, qui pourra n'être qu'un simple spectroscopie de poche, et projeter sur la fente de l'appareil l'image réelle de la lampe que l'on produira avec une lentille convergente.

Placer la flamme absorbante de l'expérience précédente immédiatement en avant de la fente, en réglant les appareils de manière que toute la lumière passe à travers cette flamme et vers sa base. En regardant dans le spectroscopie, on apercevra la raie d'absorption se détachant en noir sur le fond très brillant du spectre.

Masquer maintenant avec un écran la moitié supérieure de la flamme de la lampe, de manière que la moitié inférieure de la



fente ne reçoive plus de lumière blanche et ne soit plus éclairée que par la flamme sodée. Le spectre d'émission et le spectre d'absorption seront vus en même temps dans le spectroscopie, et l'on pourra constater que la raie brillante de l'un prolonge exactement la raie noire de l'autre.

— Pour projeter cette expérience, il faut mettre dans la lanterne une source de lumière aussi éclatante que possible et placer une fente large devant le condenseur. A l'aide d'une lentille convergente placée à la distance $2f$, on projette l'image réelle de cette fente sur une autre fente devant laquelle on placera l'atmosphère absorbante formée de *plusieurs* fortes flammes sodées. C'est la fente ainsi éclairée dont on projettera le spectre à l'aide d'une lentille et d'un prisme.

— On peut montrer des raies d'absorption d'un corps gazeux à basse température, en employant des vapeurs nitreuses. On

fait se produire ces vapeurs en mettant un peu d'acide azotique et un fragment de cuivre au fond d'un tube à essais, et l'on place ce tube contre la fente éclairée de l'appareil spectroscopique.

111. Spectres d'absorption des liquides et des solides.

— Ces spectres se projettent facilement. Ayant disposé l'expérience ordinaire de la projection du spectre, on couvre la fente, jusqu'à la moitié de sa hauteur, avec la lame absorbante, et l'on peut comparer sur l'écran le spectre initial et le spectre d'absorption. — Ces observations se font plus aisément encore avec un simple spectroscopie de poche et une lampe quelconque comme source de lumière.

Les liquides à étudier seront placés devant la fente, soit dans des tubes à essais, soit dans des petites cuves à faces grossièrement parallèles, pour lesquelles on pourra prendre un flacon carré ou une petite cuve pour accumulateurs ($7^{\text{cm}} \times 7^{\text{cm}} \times 4^{\text{cm}}$) que l'on trouve couramment dans le commerce.

On examinera ainsi des feuilles de gélatine colorée ou des verres de couleur du commerce, une solution de chlorophylle (obtenue en faisant digérer des feuilles vertes dans de l'alcool pendant un quart d'heure), des solutions de couleurs d'aniline, etc. (47).

— On examinera aussi quelques gouttes de sang placées entre deux lames de verre distantes d'environ un demi-millimètre, et l'on notera la position de la double bande d'absorption de l'oxyhémoglobine. On observera ensuite la modification que subissent ces bandes d'absorption quand on fait agir le sulfure d'ammonium, modification qui ne se produit plus si l'on expose le sang pendant seulement quelques secondes dans une atmosphère contenant des traces d'oxyde de carbone.

Si l'on dispose d'un tube fermé par des glaces (tube de saccharimètre), on déterminera le degré de sensibilité de la recherche spectroscopique du sang en mettant dans ce tube de l'eau distillée contenant un peu de sang et en diluant progressivement ce liquide (133).

Corps absorbants en lumière monochromatique. — Si l'on voit que certains corps très colorés laissent passer des radiations jaunes, on examinera ces corps à la lumière d'une flamme sodée et l'on se rendra compte alors de la raison pour laquelle, sous cet éclairage, ils paraissent absolument incolores. L'expérience est très frappante avec certaines encres rouges aux couleurs

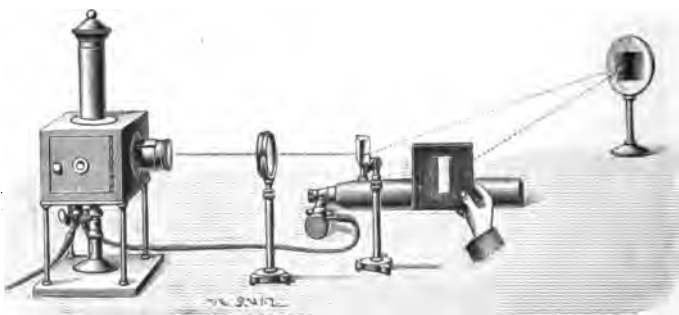
d'aniline (éosine) qui paraissent absolument incolores quand on les examine à la lumière du sodium. — Par contre, un bon verre rouge paraît noir en lumière jaune.

Corps absorbants superposés. — Inversement, on constatera que la superposition d'un verre rouge et d'un verre qui absorbe le rouge fournit un corps opaque. — De même, mettons dans un flacon une solution alcoolique de rouge d'aniline et une solution chlorhydrique de chlorure cuivreux. Les deux liquides se superposent en raison de leur différence de densité, et ils ne laissent passer l'un que du vert et l'autre que du rouge. Mais, si l'on vient à mélanger ces deux corps par l'agitation, on n'a plus qu'un liquide noir (113, 206).

SYNTHÈSE DES COULEURS.

112. Combinaison des lumières simples. — Reprendre les dispositifs qui ont servi à la projection du spectre (**VI, 106**), mais projeter le spectre sur la surface d'un miroir concave qu'on aura placé à une distance du prisme à peu près égale au rayon.

En explorant le faisceau réfléchi avec un écran blanc, on verra les différents faisceaux colorés, d'abord séparés, s'entre-croiser et se



séparer ensuite. L'image du prisme se trouve à leur rencontre. Cette image est blanche si l'on a employé de la lumière blanche; elle présente, en tous cas, la teinte de la lumière incidente, et l'on peut faire varier cette teinte à volonté en plaçant des verres colorés devant la source.

— On peut faire cette expérience de l'analyse et de la synthèse de la lumière rien qu'avec un prisme et une seule lentille. On règle le

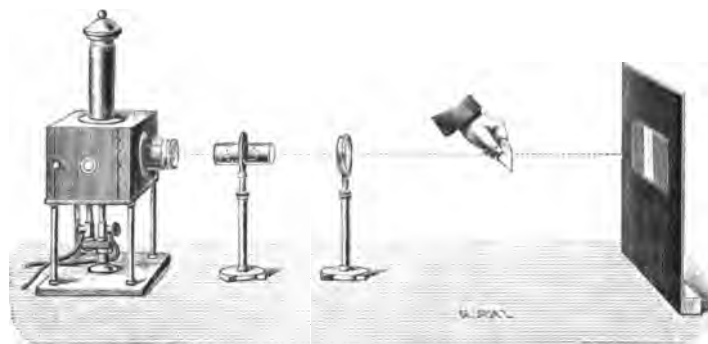
condenseur de la lanterne de manière à avoir un faisceau assez divergent pour couvrir tout le prisme, qui sera placé à une distance de la fente à peu près égale à la distance focale de la lentille. On place ensuite cette lentille bien centrée dans le faisceau réfracté et l'on projette l'image du prisme sur un écran qui ne doit pas être trop éloigné (2^m ou 3^m). Cette image du prisme est *blanche*, ou, du moins, elle a même teinte que la lumière initiale.

En explorant le faisceau lumineux entre la lentille et l'écran, on trouvera le spectre réel vers la distance $2f$.

— Dans les deux expériences ci-dessus, si l'on intercepte une partie du spectre, on obtiendra une image colorée du prisme, et l'on pourra en faire varier la teinte à volonté.

113. Couleurs complémentaires. — On peut donner à ces expériences une forme très frappante en *dévi*ant certaines couleurs du spectre au lieu de les supprimer.

Pour cela, dans le plan où se produit le spectre réel, on place



un prisme d'environ 4° (verre prismatique brut pour binocle), de manière à dévier une partie des radiations. On obtient alors sur l'écran deux images colorées du prisme, qui empiètent l'une sur l'autre; chacune d'elles présente une couleur uniforme, mais ces couleurs sont complémentaires et donnent du blanc dans la partie commune des deux images.

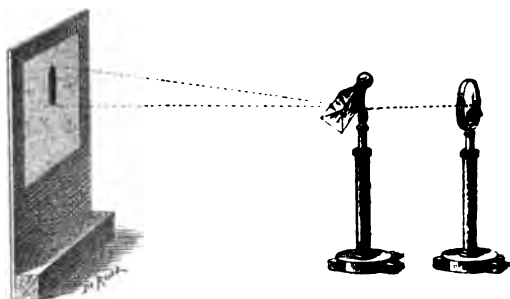
RADIATION INFRA-ROUGE ET RADIATION TOTALE.

114. Spectre infra-rouge. — Recevoir la lumière solaire sur un prisme, placer au delà de ce prisme une lentille convergente orientée de manière à recevoir normalement la lumière, et mettre

dans le plan focal de la lentille un morceau de papier recouvert d'*iodure double de mercure et d'argent*. Cet iodure, qui est jaune et qui vire au rouge quand on le chauffe vers 45° , va changer de teinte partout où l'échauffement sera suffisant (1).

On constatera que le virage du papier s'est produit depuis le milieu du spectre jusqu'au rouge et même au delà, montrant ainsi l'existence du spectre *infra-rouge*.

L'expérience est particulièrement nette quand on emploie un



prisme et une lentille de sel gemme. On peut même, dans ce cas, allumer un morceau de papier noir mat en le plaçant dans l'*infra-rouge*.

115. Réflexion. — Recevoir la lumière solaire sur un miroir concave et projeter l'image du soleil sur un morceau de papier : le papier sera brûlé.

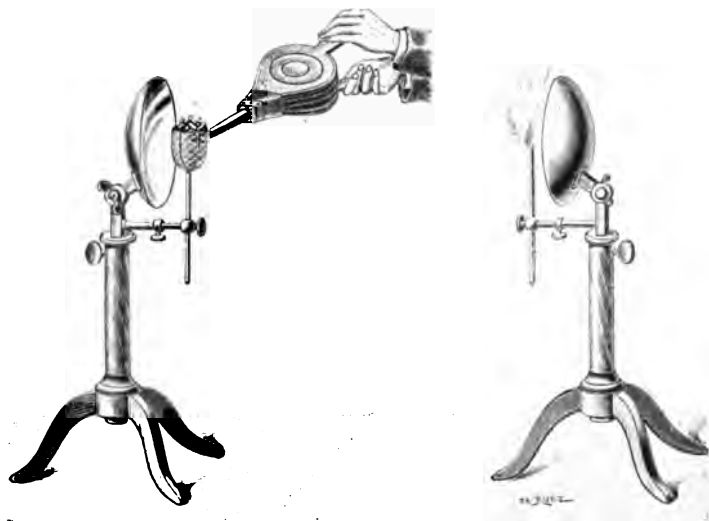
— Si l'on reçoit l'image du soleil sur un morceau de papier d'étain, les radiations sont de nouveau réfléchies et l'étain ne s'échauffe pas beaucoup. L'échauffement est, au contraire, considérable, et le métal fond si on l'a recouvert de noir de fumée. Pour réussir cette expérience quand le soleil n'est pas très ardent, il convient de se servir d'un miroir argenté sur sa face antérieure, et l'on pourra

(1) Pour préparer l'iodure sensible, on traite un sel mercurique *en excès* par de l'iodure de potassium et de l'azotate d'argent; on obtient un précipité jaune orangé qui est le corps cherché. — Un excès d'iodure de potassium donnerait de l'iodure rouge; avec un excès d'azotate d'argent, on aurait un iodure jaune paille, et l'un et l'autre sont moins sensibles à l'action de la chaleur. — Le précipité obtenu s'est rassemblé très vite, on décaute, on lave avec de l'eau contenant encore un peu de sel mercurique, on laisse reposer, on décante encore et l'on ajoute enfin un peu de gomme pour faire une peinture légère que l'on applique au pinceau (63, 206, 208).

prendre comme miroir un fragment de ces boules argentées qui servent d'ornement aux jardins (212).

— La réflexion de l'infra-rouge s'observe de façon très nette dans l'expérience classique des *miroirs conjugués*, qui doit se faire avec des miroirs métalliques. On dispose les miroirs bien en face l'un de l'autre, à une distance qui peut être de plusieurs mètres. On met une bougie devant le milieu de l'un d'eux, on cherche son image dans l'autre pour déterminer sommairement le foyer, et c'est là que l'on place soit une corbeille contenant des charbons ardents, soit une pastille de magnésie portée à l'incandescence par un chalumeau oxyhydrique, soit encore un arc électrique.

Vers le foyer de l'autre miroir, on trouve une image du corps



incandescent et l'on y place par exemple du fulmi-coton. Si l'on augmente alors l'activité de la source de chaleur, le fulmi-coton s'enflamme (77).

— Une expérience du même genre, mais à petite échelle, peut être montée de la manière suivante :

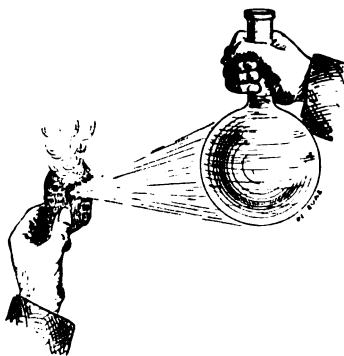
Prendre comme source de chaleur une feuille de tôle ($30^{\text{cm}} \times 4^{\text{cm}} \times 0,05$) repliée à angle droit d'un côté et à 45° de l'autre, de manière qu'on puisse la chauffer fortement à cette extrémité au moyen d'un bec Bunsen. A 50^{cm} ou 1^{m} de cette source, placer un miroir métallique concave tel qu'un réflecteur

de lanterne et chercher où se trouve l'image de la tôle rougie au feu. Si l'on reçoit cette image sur une feuille de papier recouverte d'iodure double de mercure et d'argent (VI, 114), ce papier



sensible vire rapidement du jaune au rouge à l'endroit où se forme l'image.

116. Réfraction. — On allume un morceau de drap noir ou d'amadou en concentrant la chaleur solaire avec une lentille convergente, ou même avec un ballon de verre rempli d'eau. — On réussit encore ces expériences en concentrant avec une lentille la chaleur émise par un arc électrique. Mais, si l'on voulait montrer la concentration de la chaleur émise par une lame de tôle chauffée, en se servant, comme indicateur, du papier recouvert d'iodure sensible, on



serait obligé d'employer une lentille faite de *sel gemme*, bien plus transparente que le verre pour les radiations infra-rouges.

117. Absorption et transparence. — Les expériences de réflexion et de réfraction de la chaleur rayonnée par le soleil ou par l'arc électrique réussissent presque aussi bien quand on filtre la lumière à travers une solution d'iode dans le sulfure de carbone, qui arrête tout le spectre visible en laissant passer l'infra-rouge. C'est ainsi qu'on peut brûler un morceau de drap noir en le plaçant au foyer d'un ballon ($V = 250\text{cm}^3$) plein de la solution



d'iode. — Ce foyer se trouve à une distance de la face de sortie un peu inférieure au $\frac{1}{2}$ du diamètre du ballon (208).

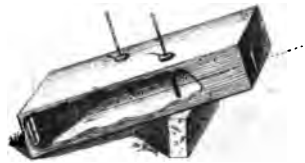
— De même, si l'on envoie la lumière solaire sur un radiomètre, ce radiomètre continue à tourner si on le met à l'ombre d'une cuve contenant la solution d'iode (151).

— Inversement, dans l'expérience où l'on concentre avec un miroir la chaleur d'une lame de tôle chauffée au rouge (VI, 115), on constatera que l'effet observé disparaît à peu près totalement si l'on interpose une lame de verre de 0^{cm} , 2 ou 0^{cm} , 3 d'épaisseur sur le trajet des radiations.

118. Actinomètre. — *Montage.* — Construire une caisse en sapin ($50^{\text{cm}} \times 15^{\text{cm}} \times 10^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}$) que l'on aura peinte en noir mat à l'intérieur avant de clouer la dernière face. — Creuser au ciseau, dans les petites faces, deux fentes verticales ($4^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}$ et $6^{\text{cm}} \times 3^{\text{cm}}$) placées en regard l'une de l'autre au tiers de la largeur de la boîte. — Dans le dessus de la boîte, à 20^{cm} de la face antérieure, où se trouve la petite fente, percer un trou circulaire ($d = 1^{\text{cm}}$, 8) dans le plan des fentes, et percer 10^{cm} plus loin un second trou tout à fait en dehors de ce plan.

Coller enfin du papier d'étain sur la face antérieure, en évitant bien entendu de masquer la fente, et fermer au contraire la fente opposée par une feuille de papier blanc.

Expériences. — Se procurer deux thermomètres et peindre le réservoir de l'un d'eux avec du vernis noir chargé de noir de fumée. Installer ces deux thermomètres dans la boîte en les passant dans des bouchons fixés dans les trous. On aura soin de placer le thermomètre à réservoir noirci dans l'alignement des fentes.



Attendre quelques minutes pour que l'équilibre de température soit atteint; et noter, s'il y a lieu, la différence des indications des instruments, en faisant les lectures au $\frac{1}{10}$ de degré.

Mettre alors cet actinomètre au soleil, en l'orientant de manière que les rayons entrent par la petite fente et tombent sur le thermomètre à réservoir noirci. On maintient facilement ce réglage en observant par transparence l'ombre portée par le thermomètre sur l'écran de papier que l'on a collé sur la grande fente.

Le thermomètre s'échauffe rapidement; on détermine la loi de

l'échauffement en fonction du temps, en notant de minute en minute les températures indiquées par les deux thermomètres. Pendant cette partie de l'expérience, pour réduire l'échauffement général de l'appareil, il serait bon de le protéger par un écran recouvert de papier d'étain, qui ne laisserait passer que les rayons qui doivent pénétrer à l'intérieur de la caisse.

Quand la température stationnaire est atteinte, ce qui peut demander 5 ou 10 minutes, on porte rapidement l'actinomètre à l'ombre et l'on détermine la loi du refroidissement en notant encore, de minute en minute, la différence des températures indiquées par les deux thermomètres. (On pourra vérifier, en passant, que l'on trouve bien une vitesse de refroidissement proportionnelle à l'écart des températures.)

Au moyen des données de l'expérience, on calculera la vitesse d'échauffement pendant les premières minutes d'exposition au soleil, en la corrigeant des pertes de chaleur, déduites elles-mêmes de la mesure du début du refroidissement. On appréciera ensuite la masse de mercure échauffée en évaluant les dimensions du réservoir thermométrique, et l'on en déduira, en valeur absolue, la quantité de chaleur que le soleil envoie par seconde sur 1 cm^2 de surface normale aux rayons.

119. Héliographe. — Remplir un ballon de verre ($V = 1^l$) avec de l'eau bouillie et filtrée, et le boucher en y laissant de l'air pour éviter la rupture par dilatation.



Déterminer expérimentalement la distance du foyer au centre du ballon (environ $\frac{3}{2}R$) et découper une planche ($e = 1\text{ cm}$) présentant une entaille demi-circulaire dont le rayon sera égal à cette distance multipliée par un facteur un peu plus petit que l'unité (sinus de la distance polaire du soleil). Cette planche sera munie de pieds, de manière à faire avec le sol un angle d'environ 45° (égal au complément de la latitude du lieu) et l'on fixera avec quelques pointes une bande de carton

de couleur sombre ($h = 5\text{ cm}$) le long du bord de l'entaille circulaire.

Disposer le ballon dans un support, le col dirigé à peu près sui-

vant l'*axe du monde*, et placer la planche évidée dans la direction perpendiculaire, en l'approchant du ballon de manière que l'image du soleil soit sur la bande de carton.

L'appareil ainsi disposé enregistre les durées de l'éclairement solaire direct par les longueurs de carton qui se trouvent brûlées par l'image du soleil (129).

TRANSFORMATIONS DES COULEURS SIMPLES.

120. Invariabilité des couleurs simples. — Fermer les volets de la salle et s'éclairer avec des becs Bunsen à flamme de sodium (VI, 105).

Examiner à cette lumière des objets de couleur, des affiches colorées par exemple qui, au jour, présentaient les teintes les plus diverses et reconnaître qu'ils ne présentent plus qu'une même couleur jaune plus ou moins claire. — On s'assurera avec le spectroscope de poche que la lumière diffusée par ces objets a bien la même constitution simple que la lumière qui les éclaire.

— On fera aussi l'expérience en sens inverse : on dessinera une figure au pastel, en s'éclairant en lumière monochromatique. Si l'on a pris des crayons rouge, vert, jaune ou bleu pour les différentes parties du visage, on obtient un dessin qui, à la lumière jaune, donne bien les effets ton sur ton que l'on a choisis, mais qui produit, comme bien on pense, un tout autre effet quand on l'examine à la lumière rouge ou, surtout, à la lumière du jour.

— On obtient des résultats aussi nets et plus brillants en éclairant les objets examinés au moyen du faisceau lumineux de la lanterne de projection, tamisé par un verre rouge, ou bien encore en projetant sur eux un spectre réel.

121. Phosphorescence. — Délayer du *sulfure de calcium phosphorescent* dans de l'eau légèrement gommée et enduire avec cette mixture des feuilles de papier ou de tôle.

Si l'on transporte les objets phosphorescents dans l'obscurité et si on les chauffe vers 100°, on constatera que leur luminosité augmente beaucoup, puis diminue pour s'épuiser assez vite. On profitera toujours de cette circonstance pour faire disparaître rapidement les résidus de phosphorescence provenant d'une expérience, avant de passer à l'expérience suivante.

— Si l'on peut avoir la lumière directe du soleil ou même celle de

l'arc électrique, on projettera un spectre réel sur un carton blanc enduit de sulfure phosphorescent, et l'on verra quelles sont les régions du spectre qui provoquent la phosphorescence. Les résultats seront particulièrement nets si l'on emploie un prisme et une lentille de quartz qui permettront d'observer une grande étendue d'ultra-violet.

— On répétera ensuite l'expérience en projetant le spectre sur un écran rendu tout entier phosphorescent par une exposition préalable à la lumière du jour, et l'on constatera que les rayons à grande longueur d'onde accélèrent d'abord l'émission de la lumière pour éteindre bientôt toute phosphorescence.

— Déterminer le temps minimum qu'il faut à la lumière du jour pour rendre lumineux le sulfure de calcium, puis chercher à obtenir cette luminosité avec des sources artificielles. On essayera notamment la lumière d'un manchon à incandescence puis celle d'une lampe à pétrole, que l'on aura réglée de manière à produire sur l'écran des éclaircissements que *l'œil* jugerait sensiblement égaux, et l'on se rendra compte de la différence des effets produits sur la matière phosphorescente.

122. Fluorescence. — Rendre de l'eau fluorescente en y ajoutant une trace de *fluorescéine*, et constater que le liquide exposé à la lumière est lumineux dans toute sa masse. Placer le liquide fluorescent dans une cuve grossièrement parallélépipédique, telle qu'un vase pour accumulateur; envoyer à travers le liquide un faisceau lumineux limité par un écran et constater que la luminosité est localisée sur tout le trajet de la lumière.

— Pour déterminer la nature des rayons qui provoquent la fluorescence, on projettera un spectre réel sur un écran et l'on y promènera un tube à essais contenant l'eau fluorescente. On verra la fluorescence s'éteindre brusquement après le vert et ne plus réparaître pour les lumières à grandes longueurs d'onde. Par contre, si l'on peut avoir la lumière solaire directe et si l'on dispose d'un prisme et d'une lentille en quartz pour projeter le spectre du soleil (**VI, 107**), on pourra observer la fluorescence dans une longue région d'ultra-violet.

Fluorescence superficielle. — Rendre de l'eau fluorescente en y versant quelques gouttes d'une solution sulfurique de *sulfate de quinine* et constater que la fluorescence bleue obtenue est seulement superficielle.

— Pour montrer le pouvoir absorbant considérable de ce liquide pour les rayons qui provoquent sa fluorescence, il suffit d'y plonger un tube à essais contenant une petite quantité du même liquide. Le tube, qui était lumineux, s'éteint brusquement quand on le plonge dans la cuve fluorescente.



— On montrera enfin que les rayons absorbés par le sulfate de quinine sont précisément ceux qui sont susceptibles de provoquer une vive *phosphorescence*.

Pour cela, on exposera à la lumière du jour, pendant quelques secondes, une feuille de carton enduite de sulfure de calcium, une partie du carton étant éclairée directement et l'autre partie éclairée par la lumière qui a traversé la cuve fluorescente. Portant ensuite le carton dans l'obscurité, on verra l'endroit où se trouvait l'ombre du sulfate de quinine se détacher en noir sur le fond lumineux du sulfure phosphorescent. — On aura soin de s'assurer que cet effet ne se produit pas avec de l'eau pure.



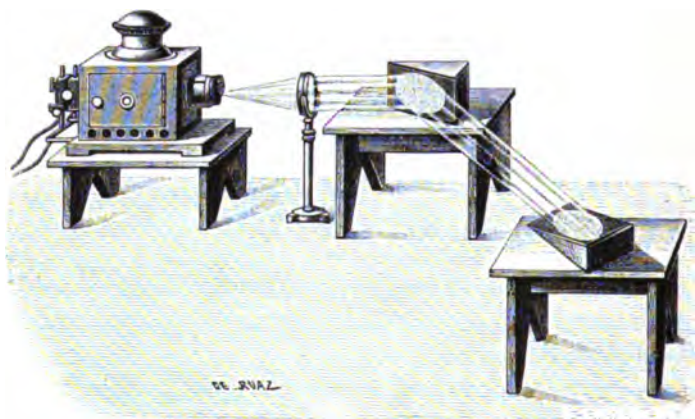
POLARISATION ET DOUBLE RÉFRACTION.

123. Polarisation par réflexion. — A défaut de verre noir, on emploiera des glaces sans tain que l'on aura noircies par derrière en se servant, par exemple, d'une peinture très épaisse faite de noir de fumée délayé dans de l'essence de térébenthine additionnée d'un peu de vernis.

Il est assez commode d'avoir deux miroirs noirs portés par des montures articulées; mais on y supplée aisément en fixant les verres

noirs ($10^{\text{cm}} \times 20^{\text{cm}}$) contre les faces hypoténuses de deux supports prismatiques en bois dont les côtés de l'angle droit seront dans le rapport de 2 à 3 ($\text{tang } \alpha = \frac{1}{n} = \frac{2}{3}$; $\alpha = 33^{\circ}, 5$).

Pour montrer en projection l'existence de la polarisation, on réalise un faisceau grossièrement cylindrique en projetant au loin l'image d'une large ouverture éclairée par la lanterne. On envoie ce faisceau sur le miroir polariseur placé verticalement de manière que



la lumière tombe sous l'incidence de $56^{\circ}, 5$ ($\text{tang } i = n$) et l'on renvoie le faisceau sur le miroir analyseur sous cette même incidence.

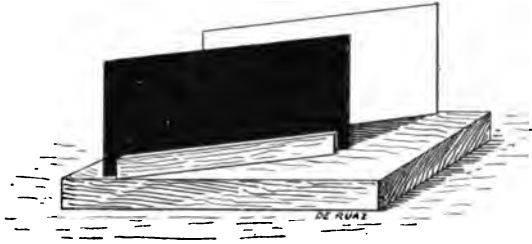
L'expérience consiste à étudier les variations d'intensité de la lumière réfléchie quand le miroir analyseur tourne autour du faisceau qu'il reçoit, depuis la position d'extinction, où les plans d'incidence sont croisés et qui est celle que la figure représente, jusqu'à la position où les miroirs sont parallèles et pour laquelle on obtient le maximum de lumière.

On constatera ainsi que la polarisation de la lumière réfléchie sous l'incidence de $56^{\circ}, 5$ est complète. On verra expérimentalement aussi que, sous une autre incidence, la polarisation ne serait que partielle, c'est-à-dire que la lumière réfléchie par le second miroir ne disparaîtrait pas complètement.

124. Analyseur à vision directe. — Pour des observations individuelles, on construira un analyseur à vision directe constitué par deux verres noirs ($5^{\text{cm}} \times 10^{\text{cm}}$) disposés parallèlement à 4^{cm} de distance, de manière que le parallélogramme limité par les traces des miroirs ait un angle de $33^{\circ}, 5$. On fixera ces lames de verre sur

une plaque de bois ($14^{\text{cm}} \times 14^{\text{cm}} \times 2^{\text{cm}}$) en les collant contre des tasseaux ($10^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}, 5 \times 1^{\text{cm}}, 5$) cloués sur la plaque et faisant avec un de ses côtés ce même angle de $33^{\circ}, 5$ ($\text{tang } \alpha = \frac{2}{3}$).

— Avec cet appareil, orienté de manière à recevoir la lumière sous l'angle de polarisation, on étudiera la lumière réfléchiée par une lame de verre sous une incidence quelconque et l'on verra que, si l'angle



d'incidence est de $56^{\circ}, 5$, la lumière réfléchiée est entièrement polarisée, mais que la lumière transmise n'est polarisée que partiellement. On étudiera aussi la lumière du ciel, à angle droit du soleil, et la lumière qu'un objet quelconque renvoie par réflexion diffuse et l'on y constatera en général l'existence d'une polarisation très notable.

125. Double réfraction. — Placer un rhomboïdre de



spath ⁽¹⁾ au-dessus d'un point blanc sur fond noir ou d'un point noir sur fond blanc et observer d'abord les deux images à l'œil nu : présentent-elles des différences de couleur ou d'éclat?

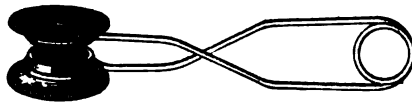
(¹) A défaut de spath on peut observer la double réfraction sur des cristaux d'azotate de sodium que l'on prépare par évaporation d'une solution saturée. Pour éviter, autant que possible, leur altération par déliquescence, on les vernira en les trempant dans un vernis léger fait de gomme laque dissoute dans l'alcool (47).

Regarder ensuite ces deux images par réflexion à travers l'analyseur à vision directe de tout à l'heure et faire tourner cet analyseur autour de la direction des rayons qu'il reçoit. Les deux faisceaux lumineux sont polarisés; on déterminera l'angle que font les deux plans de polarisation : c'est un angle droit.

— On fera ensuite l'expérience en sens inverse, c'est-à-dire que l'on regardera à travers le spath l'image polarisée d'un objet éclairé vu par réflexion sur les glaces noires; et l'on étudiera les variations d'intensité des deux images en faisant tourner le spath sur lui-même. Les deux positions d'extinction sont à angle droit.

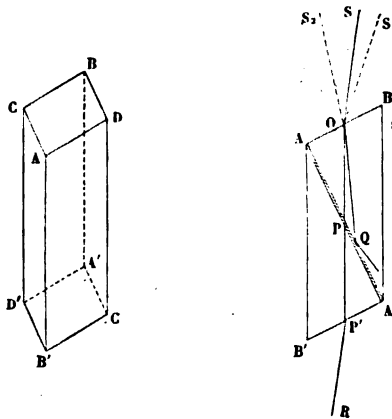
— Si l'on dispose de deux spaths, on regardera encore un objet à travers les spaths superposés et l'on verra comment varient les intensités des quatre images quand on tourne l'un des spaths par rapport à l'autre.

Tourmaline. — Recommencer les mêmes expériences avec les



lames de tourmaline de la *pince à tourmalines*. On n'obtiendra plus deux images par réfraction, mais une seule, qui sera cependant complètement polarisée.

Nicols. — Rappelons, enfin, qu'on emploie le plus générale-



ment comme polariseur et comme analyseur un *prisme de Nicol*. On l'obtient en sciant un rhomboèdre de spath ABCDA'B'C'D'

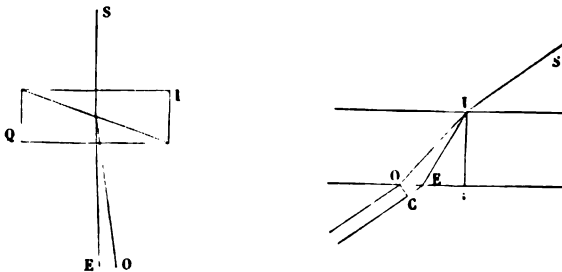
suivant un plan diagonal et en recollant les deux moitiés avec du baume de Canada. Les dimensions du rhomboédre sont choisies de manière que le rayon *ordinaire* OQ provenant de SO subisse la réflexion totale tandis que le rayon *extraordinaire* est transmis en P'R. — Le champ du *Nicol* est assez étroit. On n'utilise en effet que les directions des rayons incidents comprises entre la direction S_1O pour laquelle le rayon ordinaire est réfléchi totalement, et la direction S_2O pour laquelle le rayon extraordinaire disparaîtrait à son tour.

126. Projections. — Toutes ces expériences peuvent être facilement montrées en projections. On met devant la lanterne un diaphragme à trous dont on projette l'image sur l'écran et l'on place le



spath biréfringent contre l'ouverture; on voit alors l'image se dédoubler. On détermine ensuite l'état de polarisation de la lumière en plaçant l'analyseur immédiatement après le spath polariseur.

Si l'on emploie pour cette expérience des *prismes* biréfringents, on devra les placer, non plus contre l'ouverture du diaphragme, mais



au delà de la lentille de projection, à l'endroit où se forme l'image de la source de lumière. On remarquera en effet que ces appareils, formés d'un prisme de verre P accolé à un prisme de spath Q,

produisent une *déviati on angulaire* (1) inégale des deux faisceaux (1^{re} figure) et non plus une *translation* inégale des deux images comme le fait un rhomboèdre de spath (2^e figure).

127. Polarisation rotatoire. Principe des saccharimètres. — Dans l'une quelconque des expériences précédentes, où l'on observe l'extinction d'un faisceau polarisé, si l'on place entre l'analyseur et le polariseur une lame de *quartz* taillée perpendiculairement à l'axe et si l'on opère en lumière blanche, on verra réapparaître de la lumière présentant une certaine coloration.

Opérant alors en lumière monochromatique (verre rouge), on pourra rétablir l'extinction en tournant l'analyseur d'un certain angle dans le sens convenable. Cette expérience se fait commodément avec l'appareil que nous indiquons pour l'expérience suivante.

— Si l'on dispose d'un tube fermé par des plaques de glace (tube de saccharimètre, $l = 20^{\text{cm}}$), on pourra constater l'existence du pouvoir rotatoire d'une solution de sucre et sa variation avec la concentration.

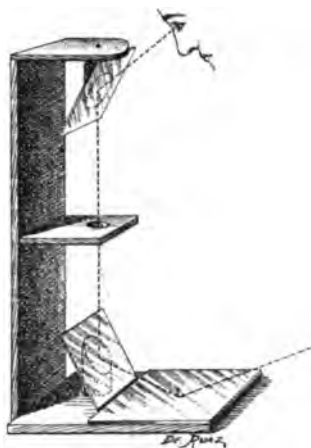
128. Polarisation chromatique. — Entre l'analyseur et le polariseur à l'extinction, mettre une lame cristalline très mince, telle qu'une lamelle de mica ou de gypse obtenue par clivage; on verra réapparaître une lumière colorée, qui disparaîtra pour deux positions rectangulaires de la lame cristalline.

Pour les autres positions de la lame, même si l'on opère en lumière monochromatique, on ne pourra pas rétablir l'extinction par une rotation de l'analyseur, comme on y arrivait dans l'expérience faite avec le quartz.

— Pour l'observation individuelle, on pourra disposer les appareils comme l'indique la figure. On prépare un support ($h = 30^{\text{cm}}$) comprenant une base ($16^{\text{cm}} \times 10^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}$, 5), une tablette supérieure ($7^{\text{cm}} \times 6^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}$) et une tablette intermédiaire ($7^{\text{cm}} \times 7^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}$), distantes de 15^{cm} . Un miroir horizontal ($10^{\text{cm}} \times 10^{\text{cm}}$) placé sur la base du support et, s'il le faut, un second miroir convenablement incliné réfléchissent la lumière du ciel vers un verre noir ($7^{\text{cm}} \times 7^{\text{cm}}$) incliné sur la verticale d'un angle de $33^{\circ}, 5$ ($\tan \alpha = \frac{2}{3}$) qui polarise cette lumière et la renvoie verticalement.

(1) Les déviations produites ne dépendant que des *angles* des prismes, on peut construire à très bas prix des prismes biréfringents de petites dimensions, avec lesquels on fait aisément l'étude d'un faisceau polarisé en plaçant le prisme biréfringent tout près de l'œil.

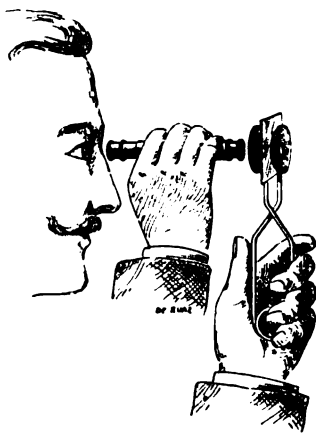
La lame étudiée sera placée au-dessus d'une ouverture ($d = 2^{\text{cm}}$) faite dans la tablette intermédiaire et l'on regardera cette lame



par réflexion sur un verre noir analyseur ($5^{\text{cm}} \times 5^{\text{cm}}$) incliné, lui aussi, de $33^{\circ}, 5$ sur la verticale.

Pour tenir les miroirs inclinés et pour qu'ils puissent tourner autour de la verticale, on pourra les coller contre de forts bouchons de liège ($h = 5^{\text{cm}}$; $d = 3^{\text{cm}}, 5$), taillés en biseau sous l'angle voulu et dans lesquels on fera pénétrer un clou traversant soit la tablette supérieure du support, soit sa base (47).

129. Blanc d'ordre supérieur. Spectres cannelés. —



Placer une lame de gypse épaisse d'environ 1^{mm} dans la pince à

tourmalines (VI, 125), entre le polariseur et l'analyseur à l'extinction. La lumière réapparaît à peu près blanche quelle que soit l'orientation de l'analyseur.

Orienter la lame de gypse de manière à obtenir le maximum de lumière, et analyser cette lumière avec un spectroscope. Le spectre que l'on obtient est sillonné des cannelures noires correspondant aux couleurs éteintes par l'analyseur.

130. Double réfraction accidentelle. — Examiner dans l'appareil précédemment décrit (VI, 128) une lame de verre placée entre le polariseur et l'analyseur à l'extinction ($1^{\text{cm}}, 5 \times 2^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}}, 3$). On fera réapparaître de la lumière soit en fléchissant la lame, soit en appliquant en son milieu une tige de fer chauffée qui provoquera une déformation anisotrope.

INTERFÉRENCES.

131. Miroirs de Fresnel. — Si l'on ne doit opérer que sous l'incidence presque rasante, les miroirs peuvent être constitués avec de la glace non argentée. Si l'on veut pouvoir employer une incidence notable, on emploiera soit de la glace, que l'on argentera soi-même, soit de la *glace platinée*, qui se trouve couramment dans le commerce.

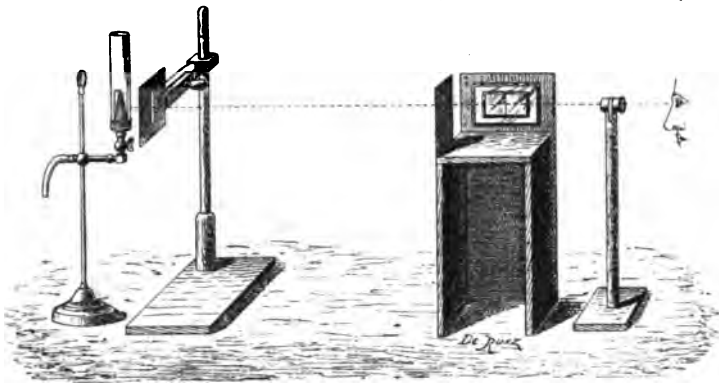
Montage. — Se procurer une lame de glace ($5^{\text{cm}} \times 10^{\text{cm}}$), la couper en deux par un trait de diamant, et séparer les deux parties par un effort brusque. Peindre les deux glaces par derrière avec du vernis noir et les replacer en contact sur le prolongement l'une de l'autre contre une plaque de verre un peu plus grande, en les fixant avec de la cire molle ou du mastic de vitrier. L'ensemble est ensuite placé verticalement sur un support ($h = 40^{\text{cm}}$), et tenu aussi par de la cire molle.

Prendre comme source de lumière un bec de gaz, devant lequel on place une fente étroite ($0^{\text{cm}}, 05$) découpée au canif, soit dans une feuille de papier d'étain ($e = 0^{\text{cm}}, 001$) collée sur verre, soit dans la gélatine d'une plaque photographique développée en noir sur toute sa surface.

Si l'on disposait de la lumière solaire ou de la lumière électrique, on pourrait prendre un trou au lieu d'une fente; et le réglage serait plus aisé.

La fente étant placée verticalement à une distance des miroirs d'au moins un mètre, on oriente ces miroirs sous une incidence quelconque, par exemple sous l'incidence presque rasante. On règle leur position relative, de manière que les faces réfléchissantes fassent un angle inférieur à deux droits, et que l'image de la fente soit dédoublée dans le sens horizontal, mais de quelques millimètres seulement.

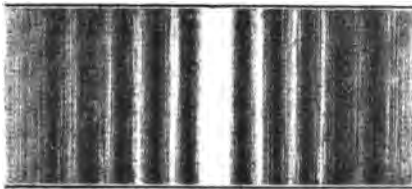
Expériences. — Faisant alors l'obscurité dans la salle, on se placera à une distance quelconque des miroirs (30^{cm}), et l'on explorera



le faisceau transmis avec une forte loupe, pour laquelle on pourra prendre un oculaire de lunette ou de microscope. — Un écran opaque protégera l'œil contre la lumière directe de la source.

Si l'on a soin de placer l'œil à l'image de la fente, c'est-à-dire vers le foyer de l'oculaire, on pourra utiliser tout le champ.

On distinguera tout d'abord les régions éclairées par un seul

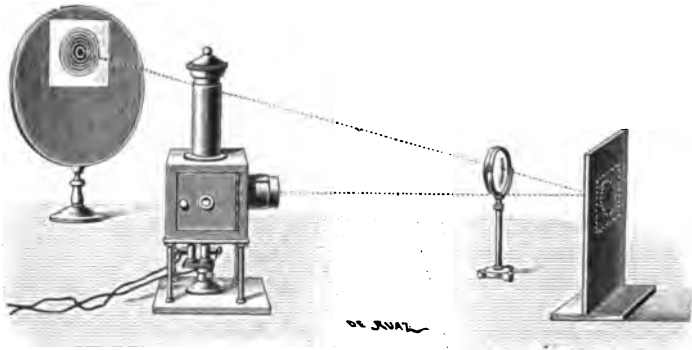


miroir et la région commune aux deux faisceaux. Agissant alors sur l'ensemble des deux miroirs et de la glace qui les porte, on inclinera très doucement ces miroirs en avant ou en arrière, jusqu'à ce qu'on voie nettement les franges d'interférences.

Ces franges sont-elles plus nettes et en voit-on un plus grand nombre si l'on place un verre rouge soit contre la fente, soit devant l'œil ?

— Si l'on se sert d'un oculaire *positif* pour regarder les franges, on placera ensuite un double décimètre dans le plan où vise cette loupe, et l'on estimera l'écartement des franges. On estimera de même l'écartement des deux images de la fente, et l'on en déduira une valeur de la longueur d'onde moyenne des radiations utilisées (77, 80).

132. Anneaux de Newton. — Mettre un verre biconvexe de 0,25 dioptrie contre une lame de glace; ou bien mettre un verre biconvexe de 0,50 dioptrie contre un verre biconcave de 0,25 dioptrie. Placer le tout devant un fond sombre, et regarder



la lame mince limitée par les deux verres en la faisant miroiter à la lumière du jour. On verra se dessiner des anneaux à centre noir (20, 47).

Les franges d'interférences seront plus nettes si l'on diminue la lumière réfléchiée sur la face postérieure de la seconde masse de verre en la recouvrant d'un vernis noir. — Elles seront plus nettes encore si l'on élimine la lumière réfléchiée par la surface antérieure en employant comme premier verre un verre prismatique de petit angle (10°). — On en apercevra, enfin, un plus grand nombre si l'on regarde à travers un verre rouge, ou, surtout, si l'on s'éclaire avec une flamme monochromatique.

Ayant constaté la forme régulière des anneaux, on mesurera le diamètre de l'un d'eux avec un double décimètre, et l'on calculera l'épaisseur correspondante de la lame d'air d'après la courbure des

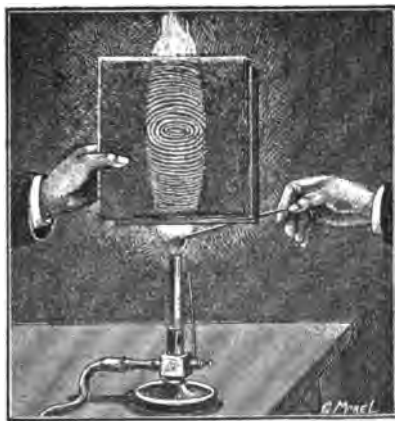
surfaces, supposée connue. On déduira de ces mesures une valeur de la longueur d'onde de la lumière employée.

Lames planes. — Si l'on cherche à observer les franges d'interférences avec deux fragments de glace *plane*, on constatera, en général, que les surfaces sont irrégulières et bien loin d'être réellement planes. La forme des franges d'interférences fera connaître avec une grande précision la différence des ordonnées en chaque point. Pour se rendre compte de la sensibilité de ce mode d'observation, il suffit de comprimer légèrement les lames entre les doigts : on voit les franges d'interférence se déformer très rapidement.

— En glissant un morceau de papier d'étain ($e = 0^{\text{cm}},001$) entre deux plaques de verre, de manière à former une lame d'air en forme de coin, on obtiendra des franges rectilignes et parallèles.

Projections. — Pour projeter ces expériences, on fixera les deux verres avec de la cire molle contre un support vertical, à 1^{m} ou 2^{m} en avant de la lanterne, et l'on concentrera sur eux le faisceau lumineux. En recevant les rayons réfléchis sur une lentille convergente, on projettera l'image de la lame mince sur l'écran, et l'on y verra se peindre les franges d'interférence.

133. Anneaux transmis. — Les franges en lumière trans-



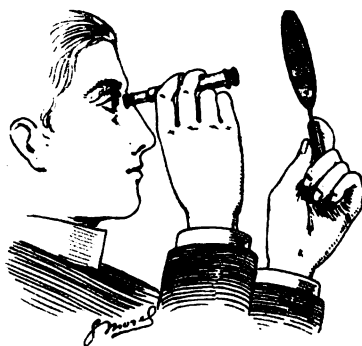
mise sont très pâles quand on emploie des surfaces de verre, parce que ces surfaces réfléchissent trop peu de lumière. Les franges deviennent au contraire très nettes si l'on emploie des

surfaces argentées ou platinées, mais qui soient métallisées assez légèrement pour être encore transparentes.

L'expérience est représentée par la figure de la page précédente : elle est des plus faciles à réaliser. On applique l'un contre l'autre deux morceaux de *glace platinée* du commerce ; et il suffit de regarder la double lame en l'éclairant par derrière avec une *flamme monochromatique* pour y apercevoir les franges dans la région éclairée.

En regardant les lames à travers une lentille convergente, et en mettant l'œil dans l'image de la flamme, que l'on placera un peu loin, la surface entière des lames paraîtra éclairée et toute couverte de franges (1).

134. Lames minces liquides. — Préparer une lame mince de liquide glycérique (III, 75) tendue dans un anneau métallique ($D = 5^{\text{cm}}$), et la tenir verticalement.



Quelles teintes présente la lame mince quand on l'examine par réflexion en lumière blanche presque normale ? Dans quel ordre les couleurs se succèdent-elles en un même point à mesure que le liquide glycérique s'écoule ? Comment les franges sont-elles transformées si l'on examine la lame à travers un verre rouge, et que voit-on en étudiant rapidement avec un spectroscopie de poche la lumière réfléchi par les différents points de la lame ?

— En se basant sur cette dernière observation spectroscopique,

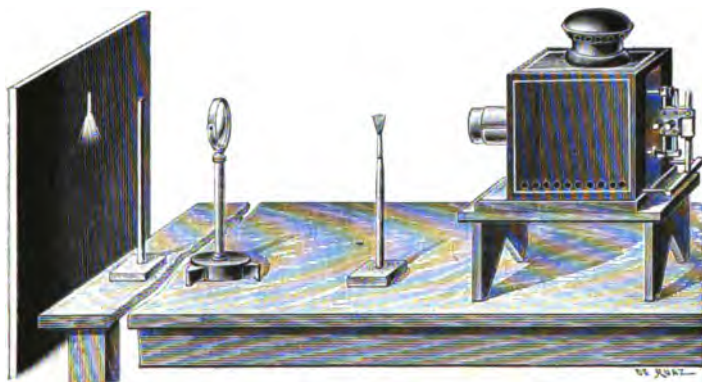
(1) La glace platinée du commerce est rarement plane. Tous les échantillons que j'ai eus entre les mains étaient légèrement concaves et donnaient des franges elliptiques avec une glace plane.

on déterminera l'ordre d'interférence des franges, et l'on en déduira l'épaisseur correspondante de la lame en lui attribuant l'indice de l'eau.

DIFFRACTION.

135. Existence de la diffraction. — Mettre une large fente devant la lanterne de projection et enfoncez le condenseur de manière à avoir un faisceau légèrement divergent. Placer une lentille de projection à une distance de la lanterne voisine de $\frac{2}{3} f$, et projeter l'image de la fente sur une tige droite, telle qu'une règle d'écolier, en réglant la position de la lentille de manière que l'image couvre juste la largeur de la règle, sans qu'on voie passer de lumière à côté.

Retirer alors cette règle et placer un pinceau aux poils écartés



entre la fente et la lentille, dans une position telle que son image vienne se peindre sur l'écran de projection où elle apparaîtra en noir sur fond blanc.

Si l'on remet alors la règle en place, elle interceptera toute la lumière qu'étudie l'optique géométrique; mais la lumière *diffractionnée* par le pinceau passera à côté de cette règle et viendra former sur l'écran une image du pinceau *lumineuse sur fond obscur* (149).

136. Diffraction par une petite ouverture. — *Montage.* — Faire dans une feuille de papier noir des trous de forme quelconque mais peu éloignés, ayant environ $0^{\text{cm}}, 3$; $0^{\text{cm}}, 2$ et $0^{\text{cm}}, 1$ de large. Coller cette feuille de papier contre une lame de verre et mettre le tout devant un bec de gaz à manchon incandescent.

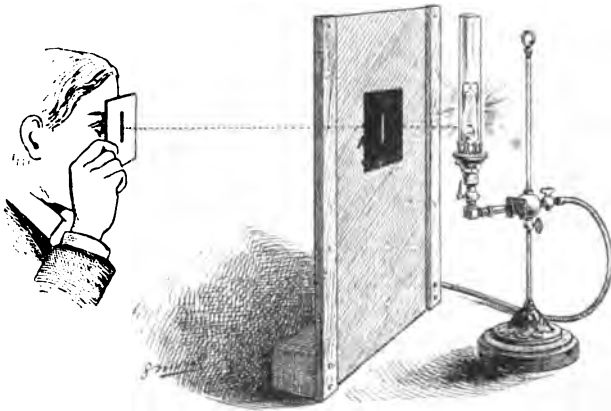
A., II.

L'observateur se place à 2^m ou 3^m au moins de cette source ponctuelle multiple, et l'examine à travers des écrans percés de petites ouvertures.

Prendre comme écran une feuille de papier noir ou de papier d'étain ($e = 0^{\text{cm}}, 002$), dans laquelle on perce d'abord trois trous bien ronds avec un clou ($d = 0^{\text{cm}}, 15$), une épingle ($d = 0^{\text{cm}}, 1$), et une aiguille ($d = 0^{\text{cm}}, 05$). On perce encore dans l'écran un autre trou aussi étroit que possible, fait avec la pointe d'une aiguille très fine (n° 10), en appuyant la feuille de papier d'étain sur le doigt ou sur un coussin de papier buvard, pour empêcher la pointe de l'aiguille de pénétrer trop profondément.

Sources quasi-ponctuelles. — Examiner les gros points lumineux à travers les petites ouvertures, et noter les dimensions de la tache lumineuse centrale et des anneaux qui l'entourent. La grandeur de ces figures de diffraction est-elle la même, quelles que soient les dimensions et la forme des *petites* sources de lumière que l'on examine ?

Mesurer le diamètre de l'ouverture à travers laquelle on regarde. D'après cette expérience, quel serait le pouvoir séparateur d'une lunette dont l'objectif n'aurait que 1^{mm} de large ?



Diffraction par une ouverture allongée. — Allonger ensuite l'une des ouvertures en doublant, par exemple, sa longueur. Dans quel sens la figure de diffraction se rétrécit-elle ? Est-elle plus lumineuse ? Voit-on apparaître d'autres anneaux ?

Fente lumineuse. — On examinera aussi une fente lumineuse à travers les mêmes ouvertures, et l'on constatera la production

des franges rectilignes résultant de la juxtaposition des figures de diffraction de chacun des points de la fente (168).

137. Franges réelles. — Pour étudier, enfin, les franges réelles, à centre blanc ou à centre noir qui se produisent dans le faisceau au delà de l'ouverture, on les examine avec un oculaire de microscope médiocrement puissant (n° 1).

Il est commode de fixer cet oculaire à l'extrémité d'un tube métallique ($l = 20^{\text{cm}}$), en le faisant tenir dans un bouchon de liège, et d'appliquer l'écran percé du petit trou contre l'autre extrémité du tube. On dirige le tube vers la source de lumière, en



ayant soin de placer l'œil à l'image de cette source, afin d'avoir un champ suffisant (54).

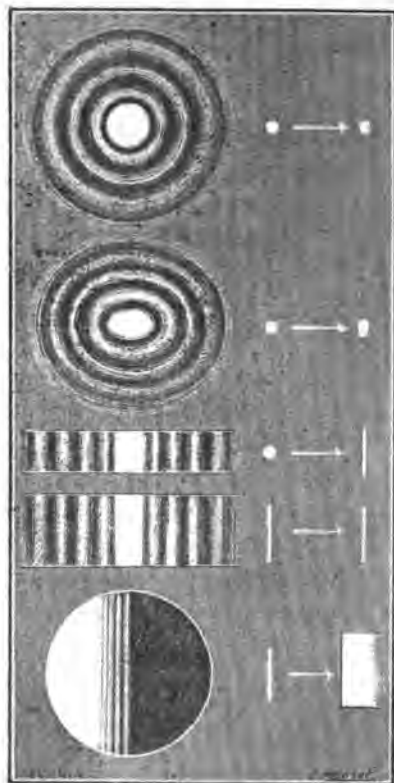
138. Diffraction par une fente. — Pour obtenir une fente étroite, on colle une feuille de papier d'étain ($e = 0^{\text{cm}},001$), sur une lame de verre, et l'on y pratique une fente en entaillant le métal avec la pointe d'une aiguille ou la lame d'un canif. — On peut aussi se servir d'une vieille plaque photographique noircie au développement, et creuser un sillon dans la gélatine.

Noter l'aspect que prennent les sources quasi-ponctuelles de tout à l'heure, quand on les regarde à travers des fentes de plus en plus fines. On regardera ensuite une fente lumineuse ($0^{\text{cm}},2$) à travers les fentes oculaires, et l'on verra apparaître de belles franges de diffraction irisées, de part et d'autre de l'image centrale, qui est blanche. Quelle est la couleur la plus déviée ?

139. Diffraction par le bord d'un écran. — Examiner une fente lumineuse ($0^{\text{cm}},1$) en plaçant devant l'œil, et parallèlement à la fente, le bord d'une carte, qui masque la moitié de la pupille.

Constater l'envahissement de l'ombre géométrique par une lumière dégradée et la production de franges de l'autre côté du bord de cette ombre.

L'expérience faite ainsi n'est pas extrêmement nette, parce que, si l'on a trop avancé l'écran, les franges que l'on cherche peuvent



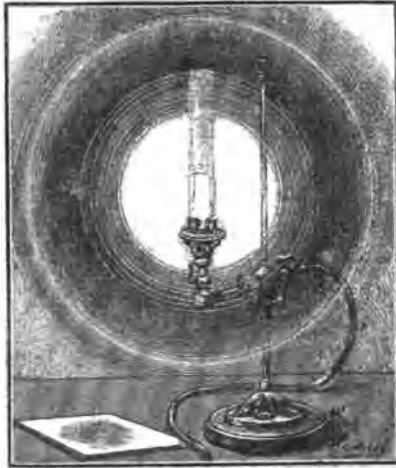
se mêler avec les franges produites par la diffraction sur le bord de la pupille.

On aura, au contraire, des résultats très nets en étudiant les franges réelles produites *en arrière* de l'écran.

Pour observer ces franges, on monte, comme précédemment, un oculaire de microscope (n° 1) à l'extrémité d'un tube métallique ($l = 20^{\text{cm}}$) et l'on fixe l'écran de papier avec de la cire molle à l'autre extrémité du tube, de manière à couvrir la moitié de la section. Diriger alors le tube vers la fente lumineuse; placer

l'œil en arrière de l'oculaire, à l'image de la source, et tourner lentement le tube sur lui-même. Les franges apparaîtront quand le bord de l'écran sera parallèle à la fente (54).

140. Diffraction par un petit écran. — Couronnes. — Reprendre le dispositif employé pour l'observation des franges réelles (VI, 137), en employant comme écran des fils fins ou des grains de lycopode placés sur une lame de verre que l'on éclaire avec une source quasi-ponctuelle (VI, 136). En regardant dans leurs ombres avec l'oculaire de microscope, on y observera des franges qui seront toujours à centre blanc. — C'est ce phénomène que l'on rencontre dans les mises au point incorrectes du microscope (54). On peut le considérer comme provenant de l'interfé-



rence des rayons diffractés par les bords de l'écran.

— Si l'on place contre l'œil la lame de verre couverte de lycopode, et si l'on regarde de loin une source de lumière d'un grand éclat, on la verra entourée de belles franges circulaires de plusieurs degrés d'ouverture ayant l'aspect des *couronnes* qui entourent parfois le soleil, et qui sont dues à une cause analogue.

141. Interférence des rayons diffractés. — Diffraction par deux petites ouvertures. — Percer deux trous d'aiguille très petits ($d < 0^{\text{cm}}, 05$) et très rapprochés ($e < 0^{\text{cm}}, 1$) dans une feuille de papier noir ou de papier d'étain. Regarder à travers ces deux trous une source quasi-ponctuelle (VI, 136), et observer les

franges noires qui sillonnent la figure de diffraction. Comment ces franges sont-elles orientées par rapport à la droite joignant les centres des ouvertures ?

— Si l'on regarde ensuite une fente lumineuse à travers le même écran, on apercevra des franges plus nettes et plus brillantes provenant de la juxtaposition des franges dues à chaque point de la fente; mais il faudra placer la ligne joignant les centres des deux ouvertures dans une direction exactement perpendiculaire à la direction de la fente.

Diffraction par deux fentes. — Préparer encore une double fente (**VI, 138**), dont les deux parties soient à une distance d'environ $0^{\text{cm}},03$, et regarder à travers cette fente, d'abord la source ponctuelle, puis la fente lumineuse. — Dans ce dernier cas, les franges apparaissent quand la double fente oculaire est parallèle à la fente lumineuse.

Ces franges sont extrêmement brillantes. Si l'on regarde avec l'autre œil un double-décimètre placé dans le plan de la fente lumineuse, les franges d'interférence semblent être des objets placés dans ce plan.

On lira alors sur le double-décimètre la distance qui semble séparer ces franges (168). Pour apprécier ensuite la distance qui sépare les deux fentes à travers lesquelles on regarde, on placera un double-décimètre en travers de ces fentes, et l'on fera la mesure de cette distance en s'aidant d'une loupe.

Ayant enfin mesuré la distance de la fente lumineuse à la double fente oculaire, on déduira de toutes ces mesures une valeur de la longueur d'onde moyenne de la lumière.

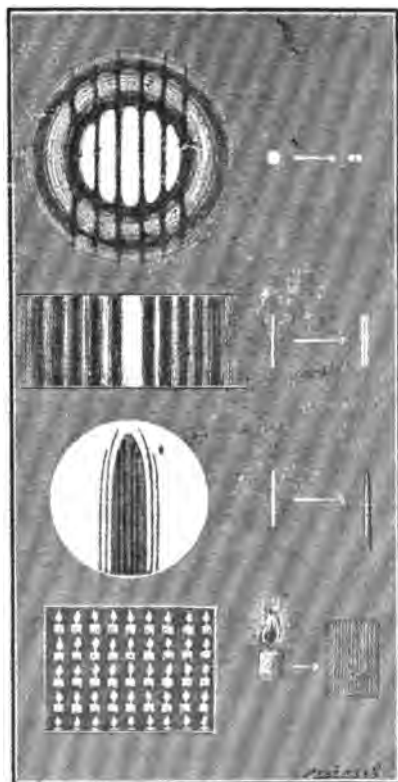
— On observera les franges d'interférences réelles situées en arrière de la double fente en regardant à travers un oculaire de microscope placé à quelque distance, comme pour les expériences de diffraction (**VI, 137**).

Diffraction par un fil fin. — En remplaçant la double fente par un fil très fin ($d = 0^{\text{cm}},02$), ou, mieux encore, par la pointe d'une aiguille placée parallèlement à la fente lumineuse, on obtient dans l'ombre de l'aiguille de belles franges dues à l'interférence des faisceaux diffractés de droite et de gauche. On voit en même temps dans les régions lumineuses des franges de *diffraction* proprement dites.

142. Réseaux. — Se procurer un réseau gravé sur verre,

ou reproduit par la photographie sur gélatine bichromatée (VI, 77). Placer ce réseau sur un goniomètre à la place du prisme, et déterminer la déviation en lumière monochromatique pour l'incidence correspondant au minimum de déviation. Cette mesure permet de calculer la longueur d'onde avec une grande précision, en supposant connue l'équidistance des traits du réseau.

— On observe un phénomène analogue à celui des réseaux proprement dits quand on regarde un point très lumineux à travers



une lunette ou à l'œil nu, et que l'on place devant l'œil ou devant l'objectif une étoffe à texture fine et régulière, telle que de la soie à bluter ou de la mousseline de soie. On voit alors l'image du point lumineux se multiplier dans les deux directions de la chaîne et de la trame, à des distances qui sont en raison inverse de l'écartement des fils (26).

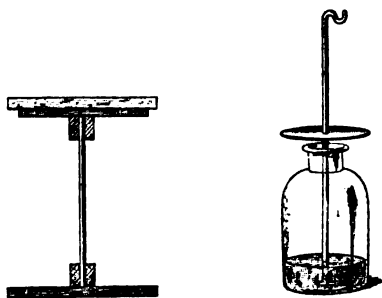


CHAPITRE VII.

ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME.

1. Isolants. — Les expériences dites d'*Électricité statique* réussissent bien par un temps sec, mais les isolements deviennent difficiles si le temps est humide, ou si l'on doit opérer dans une salle ou se trouvent un grand nombre de personnes.

Les expériences sont facilitées par l'emploi systématique des supports isolants en diélectrine (**I, 79**) ou en paraffine (¹). Ces supports doivent être conservés à l'abri des poussières, ou bien ils doivent être grattés de temps en temps. On imaginera aisément des dispositifs analogues à ceux des figures ci-contre pour donner de la rigidité aux supports comportant de la paraffine



en utilisant des baguettes de verre, des planchettes de bois et des bouchons de liège.

— On fait de *très bons* supports isolants avec de la cire à cacheter.

— Des baguettes de *silice fondue* (**I, 106**), longues de 3^{cm}, donnent un isolement parfait. On les nettoie simplement en les chauffant au rouge.

— Les supports de verre doivent être lavés et séchés avec soin.

(¹) On peut ajouter à la paraffine 2 à 3 pour 100 d'antracène; la masse obtenue est moins molle et sa surface est plus lisse (110).

Ils fournissent un isolement satisfaisant quand ils sont tièdes : on peut maintenir les appareils près d'un fourneau allumé. On améliore l'isolement par le verre en recouvrant à chaud sa surface avec de la paraffine ou avec un vernis à la gomme laque.

— Les plateaux des machines électriques peuvent être chauffés directement avec la flamme d'un bec Bunsen, pourvu qu'on prenne la précaution de les faire tourner pendant qu'on les chauffe. Mais il est plus prudent de placer la machine sur une table au milieu de laquelle on a pratiqué une ouverture ($50^{\text{cm}} \times 25^{\text{cm}}$) fermée par une toile métallique ; on chauffe alors au moyen d'un bec Bunsen ou d'un fourneau à gaz posé par terre.

— Quand les supports isolent très bien, il peut arriver qu'ils soient eux-mêmes électrisés. On fera disparaître leurs charges apparentes en passant rapidement ces objets dans la flamme d'un bec Bunsen. Cette opération devra être répétée au bout de quelques minutes pour éliminer des charges nouvelles qui reviennent à la surface de l'isolant (100, 175, 207).

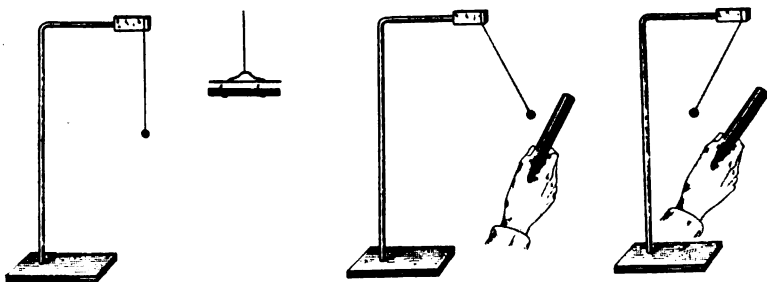
ÉLECTRISATION.

2. Électroscope. — Préparer un électroscope en suspendant un petit morceau de moelle de sureau ($d = 1^{\text{cm}}$) à un fil de soie très fin ($l = 25^{\text{cm}}$). Le fil est attaché à l'extrémité d'une potence par l'intermédiaire d'un petit bloc de paraffine. Cette potence est faite d'une baguette de verre ($l = 55^{\text{cm}}$, $d = 0^{\text{cm}}, 5$) courbée à angle droit à environ 15^{cm} d'une extrémité et mastiquée dans un trou percé dans une planchette de bois (15^{cm} ; 10^{cm} ; $1^{\text{cm}}, 5$) qui sert de support (*fig.* p. 154).

3. Attractions et répulsions. — Un corps électrisé quelconque attire la balle de sureau puis la repousse quand il a été touché par elle.

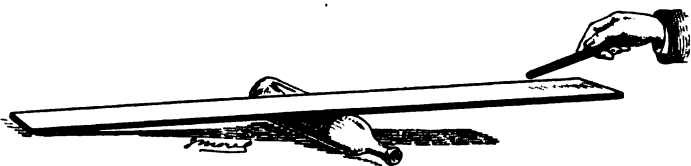
Essayer de cette manière un canon de soufre, un bâton d'ébène ou de cire à cacheter frottés avec du drap ou avec une peau de chat — du papier fortement chauffé, pour être tout à fait sec, et que l'on frotera, soit avec du drap, soit simplement entre les doigts — des baguettes de verre poli ou de verre dépoli au papier d'émeri ($d = 1^{\text{cm}}$; $l = 50^{\text{cm}}$) que l'on frotte avec une étoffe de laine ou de soie (37, 123, 146).

— Suspendre ensuite le barreau de verre ou d'ébonite à un fil plus fort au moyen d'un crochet en fil de fer ($d = 0^{\text{cm}}, 2$). En



approchant un corps électrisé ou non, on s'assurera que le barreau lui-même est aussi soumis à des forces d'attraction et de répulsion (180).

— Pour montrer que les attractions électriques peuvent déplacer des masses relativement considérables, on peut faire



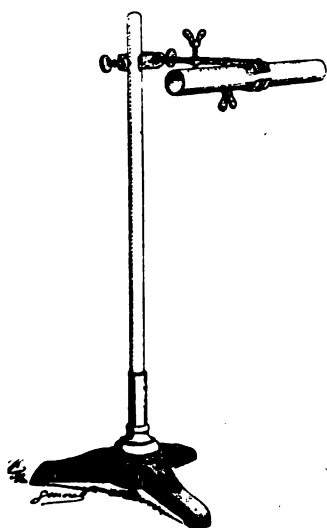
reposer une planche en équilibre sur une bouteille couchée à plat, cette planche est nettement attirée par un bâton d'ébonite électrisé (180).

4. Électrisation d'un conducteur. — En frappant avec la peau de chat un objet métallique quelconque tenu par un support à colonne de verre (¹), cet objet sera électrisé.

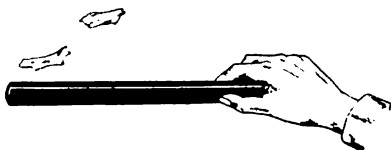
— Si l'on approche un bâton d'ébonite, fortement électrisé, d'un fragment de feuille d'or ou de clinquant battu, ce morceau de métal, d'abord attiré, est repoussé dès qu'il a touché le bâton. *Il*

(¹) Pour relier la colonne de verre à son trépied de fonte, il suffit de la sceller dans un tube de laiton. On se sert pour cela, soit d'un mastic fusible, soit d'une pâte formée de kaolin et de silicate de sodium qui fait prise rapidement et devient d'une solidité extrême.

est alors électrisé et l'on peut le faire voltiger en l'air en le



repoussant avec le bâton d'ébonite, ou bien en l'attirant avec une baguette de verre (131, 146).



5. Les deux électrisations. — Construire deux électroscopes à balle de bureau, charger l'une des balles par contact avec de l'ébonite frottée avec une peau de chat (charge négative), et charger l'autre avec une baguette de verre poli frottée avec du drap (charge positive).

Approcher de ces deux pendules des corps électrisés, comme dans les expériences précédentes, et classer ces corps en corps positifs ou négatifs selon qu'ils repoussent ou qu'ils attirent l'un ou l'autre pendule.

On notera la variabilité du signe de l'électrisation avec la nature des *surfaces* frottées. On obtient en effet des charges de signes différents si l'on se sert, soit de verre poli, soit de verre dépoli

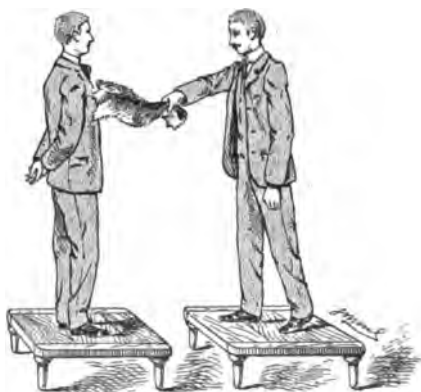
au papier d'émeri. On aura encore des changements dans le signe de l'électrisation en frottant du verre avec les différentes parties de la peau de chat.

— On pourra reconnaître le signe des charges en projetant, avec un petit soufflet, sur les corps électrisés, un mélange de fleur de soufre et de minium. Les corps positifs attirent le soufre et deviennent jaunes, tandis que les corps négatifs attirent le minium et deviennent rouges (**VII, 25**).

6. Développement simultané des deux électrisations.

— Placer deux personnes sur des tabourets à pieds de verre ($h = 25^{\text{cm}}$) ou sur des planches (50^{cm} ; 22^{cm} ; 2^{cm}) reposant chacune sur quatre petits blocs de paraffine (6^{cm} ; 6^{cm} ; 6^{cm}).

Si l'une de ces personnes frappe l'autre avec une peau de chat,



toutes deux s'électrisent; leurs cheveux se hérissent; on pourrait tirer d'elles des étincelles.

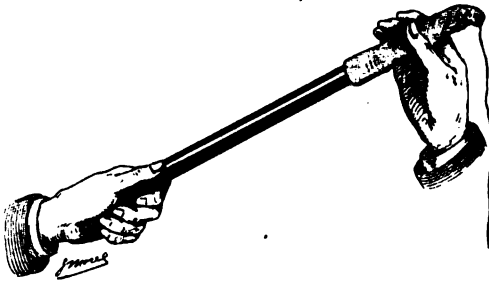
La charge de la personne frappée est négative, celle de l'autre est positive, comme elles peuvent le reconnaître en étendant la main vers un électroscope chargé (**VII, 5**). La balle de sureau sera attirée par l'une d'elles et repoussée par l'autre.

— Les deux charges sont équivalentes, car si les deux expérimentateurs viennent à se toucher, toute trace d'électrisation disparaît.

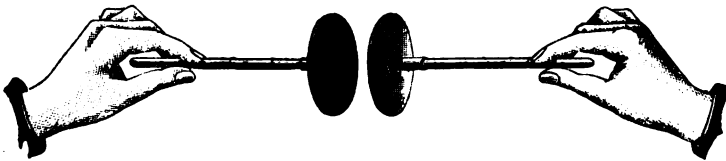
Autres dispositifs. — Coiffer un bâton d'ébonite d'un bonnet en soie ou en peau de chat attaché à un fil de soie ($l = 30^{\text{cm}}$) et frotter ces deux corps l'un contre l'autre.

Si l'on approche le bâton d'ébonite de l'électroscope sans retirer le bonnet de soie, on ne constate aucune action. Mais si l'on retire

le bonnet en le tenant par le fil isolant, et si on l'essaie à l'élec-



troscopie, on le trouve chargé positivement, tandis que l'extrémité du bâton d'ébonite est électrisée négativement (201).



— On réalise la même expérience avec un disque de bois garni



de drap ($d = 10^{\text{cm}}$) et monté sur manche de verre, qu'on frotte contre un disque de verre. Essayés ensemble à l'électroscope, ils

sont sans action, tandis que, séparément, ils manifestent des charges de signes contraires.

Emploi de l'électroscope à feuille d'or. — La démonstration se fait d'une manière bien plus frappante avec l'électroscope à feuille d'or (**VII, 14**).

Chauffer, par exemple, une feuille de papier dans la flamme d'un bec Bunsen pour qu'elle soit absolument sèche, et la poser sur le plateau de l'électroscope (*fig.* p. 157). Frotter cette feuille de papier avec un tampon fait d'un morceau de peau de chat attaché au bout d'un bâton de cire à cacheter (103, 126). Tant que le tampon reste sur le plateau, on ne voit aucun signe d'électrisation, mais, dès qu'on l'éloigne, on voit la feuille d'or de l'électroscope indiquer une forte charge négative (**VII, 24**).

7. Électrisation par le contact. — Poser l'une sur l'autre deux feuilles de papier égales ($20^{\text{cm}} \times 15^{\text{cm}}$) et les chauffer fortement dans la flamme d'un bec Bunsen. Mettre ces deux feuilles de papier sur la table sans les séparer et pendant qu'elles sont encore chaudes, appuyer énergiquement sur la feuille supérieure avec la main ou avec un objet quelconque. Faire ensuite disparaître les électrisations qui ont pu apparaître sur les surfaces extérieures en passant en même temps les mains sur les deux faces de la double feuille.

On observe alors que les deux feuilles de papier sont collées l'une sur l'autre par suite de l'électrisation des faces intérieures qui n'ont pas été frottées. En les détachant brusquement, on constate qu'elles sont effectivement électrisées de sens contraire.

On peut aussi intercaler une feuille de papier d'étain ($12^{\text{cm}} \times 8^{\text{cm}}$) entre les deux feuilles de papier. Au moment de la séparation, l'étain reste adhérent à l'une de ces feuilles, et l'on en peut tirer une étincelle.

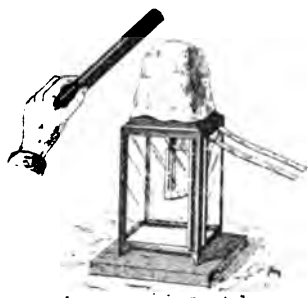
Toutes ces expériences doivent être faites très rapidement, pour peu que le temps soit humide, car le papier est très avide d'eau et il n'est isolant que quand il est tout à fait sec (82).

DISTRIBUTION ÉLECTRIQUE.

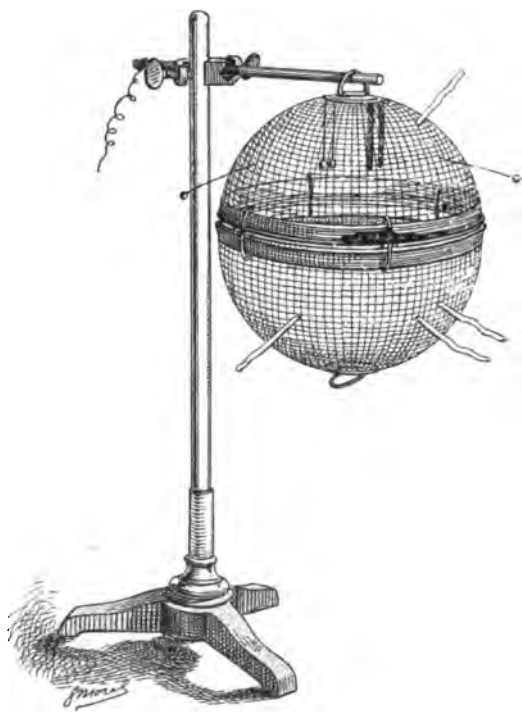
8. Conducteur entièrement fermé. — Relier la tige et la cage de l'électroscope à feuille d'or par une feuille de papier

d'étain qui recouvre complètement le bouchon de paraffine. Suspendre à l'extérieur de la cage des bandes de papier d'étain (10^{cm} ; $0^{\text{cm}},5$; $0^{\text{cm}},001$), puis poser l'appareil sur un support isolant, tel qu'une plaque de verre ou de paraffine.

Charger l'électroscope en approchant un bâton d'ébonite ou bien en se servant d'une machine électrique. Les feuilles de papier d'étain extérieures à la cage divergent fortement, mais on n'aperçoit pas le moindre déplacement de la feuille d'or placée à l'intérieur (167, 201).



9. Conducteur incomplètement fermé. — Se procurer



une de ces cloches en toile métallique qui servent de garde-manger. Fixer à l'extérieur, avec de la cire molle, des petits électro-

scopes faits d'un morceau de moelle de sureau ($d=1^{\text{cm}}$) attaché à un fil de lin ou de coton ($l=7^{\text{cm}}$). — Fixer aussi à la toile métallique d'étroites bandes de papier d'étain et de clinquant battu, qui joueront le même rôle, mais avec des sensibilités différentes. Suspendre, de même, à l'intérieur et près du sommet de la cloche, deux électroscopes à balle de sureau, placés côte à côte ($l=7^{\text{cm}}$), et un électroscope plus sensible fait de deux feuilles de clinquant battu.

Accrocher l'appareil ainsi constitué à un support à pied de verre et le mettre en communication par un fil métallique ($d=0^{\text{cm}},1$) avec une machine électrique.

— Quand on met la machine en marche, les électroscopes placés à l'extérieur de l'appareil indiquent une charge considérable.

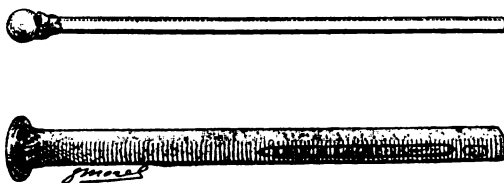
On examinera avec attention les deux électroscopes qui se trouvent à l'intérieur de la cloche et l'on notera leur degré de divergence pour les montages suivants :

- 1° La cloche est ouverte en bas ;
- 2° On tend quelques fils de fer en travers de l'ouverture ;
- 3° On ferme la cloche par une autre cloche semblable.

Dans ce dernier cas, on s'assurera que *les feuilles de clinquant ne subissent absolument aucune action électrique*, bien que le conducteur soit tout entier à claire-voie (66).

10. Emploi d'un corps d'épreuve. — *Montage.* — On emploie comme corps d'épreuve un disque de laiton mince ($d=2^{\text{cm}}$; $e=0^{\text{cm}},05$) ou bien une sphère de laiton ($D=1^{\text{cm}}$), pour laquelle on peut prendre un bouton métallique déverni.

Le corps d'épreuve est fixé à l'extrémité d'un bâton de cire à cacheter, ou bien au bout d'une baguette de verre paraffinée

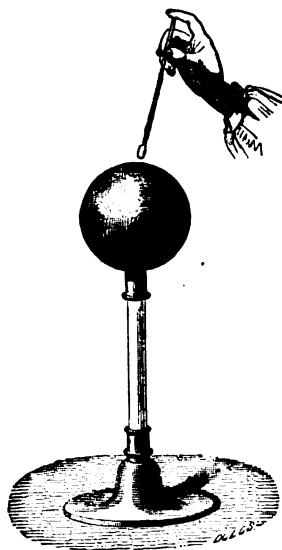


($d=0^{\text{cm}},7$; $l=25^{\text{cm}}$), où on le fait adhérer à chaud avec de la cire à cacheter.

Expériences. — Pour étudier les charges d'un conducteur à l'aide du corps d'épreuve, on monte un plateau sur la tige de l'électroscope (VII, 14) et l'on y pose un seau cylindrique. On

touche un point déterminé du conducteur étudié avec le corps d'épreuve et l'on porte immédiatement sa charge sur l'électroscope en touchant l'intérieur duseau métallique (Voir la figure, VII, 15). Notant la déviation observée, on se reporte à la graduation de l'appareil pour évaluer la charge apportée, qui est proportionnelle à la densité électrique au point où le corps d'épreuve a été chercher cette charge.

On étudiera de cette manière la distribution sur une sphère isolée — sur un conducteur allongé où la densité est plus grande dans les bouts qu'au milieu — sur le plateau de l'électrophore, où l'on trouvera plus d'électricité sur les bords qu'au centre — et sur la surface d'une boule creuse ou d'un seau métallique ($d = 20^{\text{cm}}$), à l'intérieur desquels on ne trouvera aucune charge sensible, alors même qu'on y aurait placé une pointe faisant saillie.



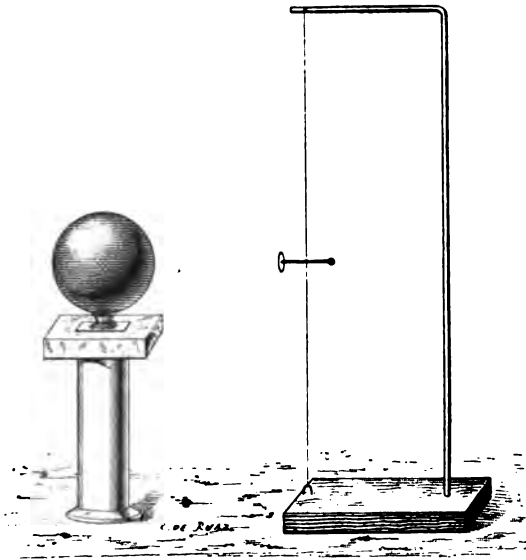
ÉTUDE D'UN CHAMP ÉLECTRIQUE.

11. Loi de Coulomb. — *Montage.* — Ramollir de la gomme laque au-dessus d'une petite flamme et l'étirer entre les doigts, de manière à obtenir des aiguilles longues d'environ 4^{cm} et ayant environ $0^{\text{cm}},1$ de diamètre. Au bout de l'une de ces aiguilles, et perpendiculairement à sa direction, fixer une rondelle découpée dans du papier doré ($d = 2^{\text{cm}}$) en la faisant tenir avec une gouttelette de solution de caoutchouc.

Tendre verticalement un fil de soie *extrêmement fin* (soie à dentelle dédoublée, $l = 50^{\text{cm}}$) sous une potence de verre. Le fixer en haut avec de la cire à cacheter, et l'attacher en bas, à un cavalier planté dans la planchette qui sert de support. Déposer une goutte de solution de caoutchouc au milieu du fil, et y coller l'aiguille de gomme laque de manière qu'elle se tienne à peu près horizontalement. — On achèvera d'établir l'équilibre avec une petite surcharge de cire molle.

A., II.

Placer enfin une boule métallique ayant au moins 10^{cm} de diamètre (boule de rampe d'escalier) sur un support isolant de hauteur telle que le centre de cette boule soit au niveau du pendule électrique. On pourra, par exemple, visser la boule de laiton sur



une plaque de métal ($7^{\text{cm}} \times 7^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}},1$) que l'on fixera sur une plaque de paraffine ($10^{\text{cm}} \times 10^{\text{cm}} \times 2^{\text{cm}}$) et l'on posera cette plaque de paraffine sur une éprouvette à pied.

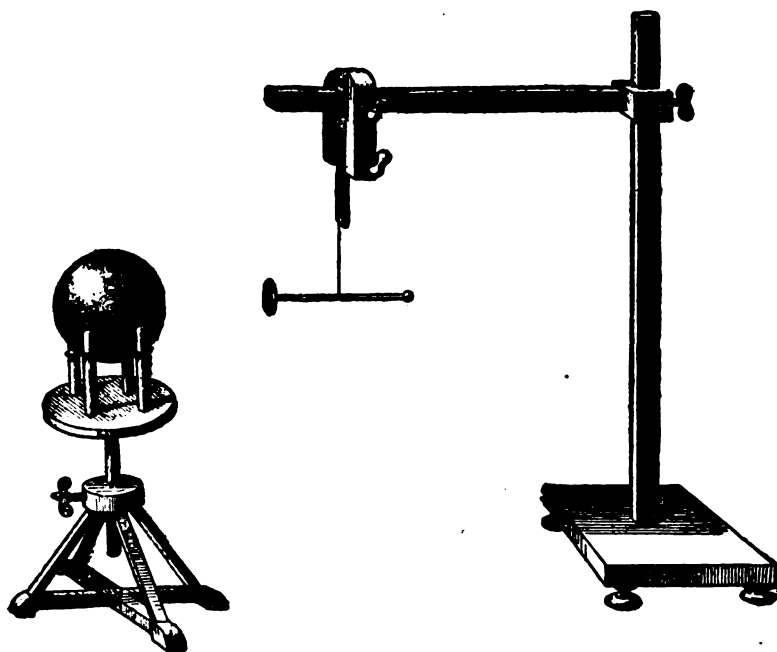
On peut encore faire reposer cette boule sur un trépied constitué par trois bâtons de cire à cacheter. C'est un dispositif semblable à celui qu'employait Coulomb, dispositif que représente la figure ci-contre (103).

Expériences. — Les appareils n'étant pas chargés, faire osciller le pendule électrique et mesurer la période des oscillations qu'il effectue sous l'influence de la torsion du fil.

Charger négativement le disque de papier doré en le touchant avec un bâton d'ébonite frotté, ou bien en agissant par influence avec le plateau de l'électrophore (VII, 34). Charger, au contraire, positivement la boule métallique en la mettant en communication avec le pôle positif d'une machine électrique ou bien en la touchant avec le plateau de l'électrophore.

Le pendule électrique s'est immédiatement orienté vers la boule électrisée. On le fait osciller, et l'on note la durée de 10 oscillations. On marque alors à la craie sur la table la position du support du pendule.

Déplacer ce pendule pour opérer à une autre distance. Revenir



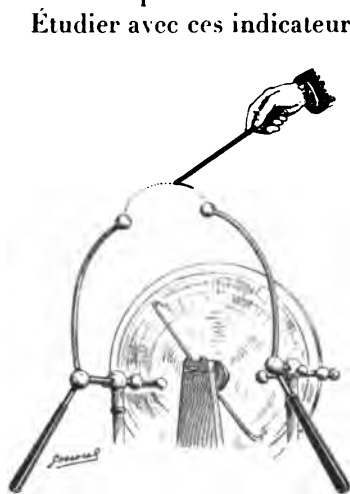
ensuite à la première position et répéter les mesures pour se rendre compte des déperditions. On éliminera leur effet en prenant une moyenne des deux déterminations.

Il est à peine besoin de dire que les mesures doivent être faites rapidement pour que les déperditions soient aussi peu importantes que possible.

On termine les mesures en relevant les distances auxquelles ont été faites les expériences d'oscillation.

La durée des oscillations du pendule est-elle proportionnelle à sa distance au centre de la boule attirante, comme l'exige la loi de Coulomb? Au degré de précision des mesures faites, y a-t-il lieu de faire une correction pour tenir compte du couple dû à la torsion du fil?

12. Direction du champ en un point. — La direction du champ en chaque point peut être déterminée en y amenant un filament mobile; son orientation fait connaître la direction cherchée. On peut prendre une feuille d'or battu ($5^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}},3$) ou un brin de fil de coton (fil à coudre défilé $l = 2^{\text{cm}}$) fixé à un fil de cuivre ($d = 0^{\text{cm}},2$). Ce fil est tenu à la main; mais, pour qu'on ne soit pas exposé à recevoir une décharge, il sera prudent de le relier directement au sol par un conducteur métallique auxiliaire (69, 180, 202).



Étudier avec ces indicateurs le champ d'un diélectrique frotté ou d'un conducteur chargé, tel qu'un plateau d'électrophore (VII, 34). On cherchera en particulier quelle est la direction du champ au voisinage de la surface du conducteur et l'on dessinera un diagramme des lignes de force du champ. — On pourra aussi, comme l'indique la figure, chercher la distribution du champ au voisinage des pôles d'une machine électrique.

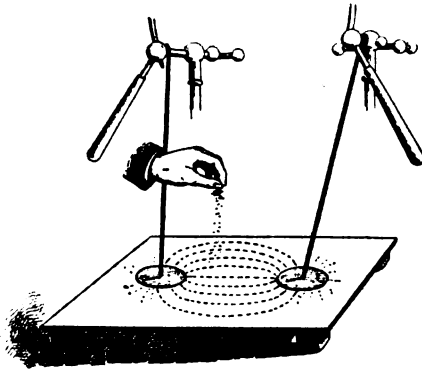
— Quand on étudie le champ au voisinage d'un conducteur porté par des supports qui isolent mal, on obtient un état permanent si une machine électrique alimente les fuites. Mais la surface des supports est chargée comme celle du conducteur, et l'on est obligé de tenir compte de ces charges quand on veut se rendre compte *a priori* de la forme des lignes de force. — Il en est de même avec des supports qui isolent plus parfaitement si l'on charge les conducteurs en les frappant avec une peau de chat : les supports isolants sont alors inévitablement électrisés et ils modifient encore la forme du champ.

13. Tracé des lignes de force. — Coller deux cercles de papier d'étain ($d = 10^{\text{cm}}$, $e = 0^{\text{cm}},001$) sur un carreau de verre ($30^{\text{cm}} \times 50^{\text{cm}}$) en les séparant par un intervalle d'une quinzaine de centimètres. Poser le carreau de verre sur des cales isolantes et relier les deux disques conducteurs aux pôles de la machine électrique par des tiges métalliques ($d = 0^{\text{cm}},5$) terminées en crochet.

Mettre la machine en marche et projeter sur la plaque de verre

du *crin* découpé en morceaux de quelques millimètres de longueur. Ces bouts de crin tracent les lignes de force du champ électrique comme la limaille de fer trace les lignes de force d'un champ magnétique (103, 123).

— Si l'on n'a pas de machine électrique, on peut opérer avec



l'électrophore. On touche l'une des feuilles de papier d'étain avec le plateau de l'électrophore pendant que l'on met l'autre feuille au sol. Mais il faut faire l'expérience à une échelle un peu plus petite et il convient de prendre une plaque de paraffine pour support du *spectre électrique* plutôt qu'une plaque de verre qui n'isole pas assez bien.

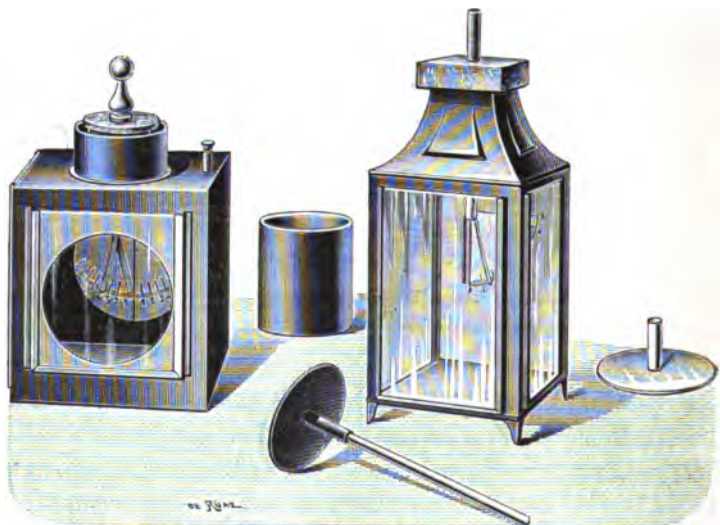
ÉLECTROSCOPE A FEUILLE D'OR.

14. Construction de l'électroscope. — On peut prendre pour cage de l'électroscope une lanterne en fer-blanc ayant au moins 10^{cm} de large et dont on aura enlevé le bougeoir et l'anneau supérieur. On ferme le haut de la lanterne avec une plaque de paraffine (6^{cm} × 6^{cm} × 2^{cm}) percée en son centre d'un trou vertical ($d = 1^{\text{cm}}$) pour le passage de la tige de l'électroscope.

La carcasse métallique de la lanterne et les vitres médiocrement isolantes qui la ferment constituent un *écran électrique* très suffisant pour la feuille d'or qu'on mettra à l'intérieur (VII, 8). Si l'on voulait que la protection fût plus parfaite, il faudrait rendre plus conductrices les parois de verre de la lanterne. On y arrive

facilement sans diminuer leur transparence en recouvrant ces lames de verre d'une couche de gélatine (VI, 77) à laquelle on a ajouté une petite quantité d'azotate de calcium.

La tige de l'électroscope est en laiton ($d = 0^{\text{cm}}, 6$, $l = 20^{\text{cm}}$). A l'une de ses extrémités on fait à la lime deux méplats sur l'un desquels on soude une plaque étroite de laiton ($6^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}}, 1$).



C'est sur l'autre méplat que l'on fixera la feuille d'or. — On soude sur la tige, à 5^{cm} environ de l'extrémité libre, une petite rondelle de métal ($2^{\text{cm}} \times 2^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}}, 05$) qui la soutiendra sur le bloc de paraffine.

La feuille d'or battu ($5^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}}, 5$), qui est la partie délicate de l'appareil, est découpée avec une paire de ciseaux sans la sortir du cahier qui la contient. On coupe du même coup les deux feuilles de papier entre lesquelles se trouve la feuille de métal.

Ayant mis une trace de suif à l'endroit de la tige où l'on veut faire adhérer la feuille d'or, on touche cette feuille avec la tige ainsi préparée. Le métal se colle et l'on peut alors le détacher du papier qui le protège sans grands risques de rupture. On a eu soin d'apporter la cage de l'électroscope tout à côté de soi et l'on achève le montage en évitant les mouvements rapides et les courants d'air qui déchireraient la feuille d'or.

Une fois monté, l'appareil est beaucoup moins fragile, mais il sera mieux encore à l'abri des courants d'air et des accidents si l'on garnit les joints des verres et de la lanterne avec du mastic de vitrier pour les rendre à peu près étanches.

Sensibilité. — Les indications de l'électroscope sont fonction de la différence de potentiel entre la feuille d'or et la cage de l'instrument. Construit comme nous venons de le dire, l'électroscope à feuille d'or permet d'apprécier des différences de potentiel variant entre une centaine et un millier de volts.

— On a une sensibilité beaucoup plus considérable si l'on examine la feuille d'or avec un microscope. On arrive, dans ce cas, à déceler des différences de potentiel de quelques volts (121).

Mesure du déplacement de la feuille mobile. — Un moyen très simple de mesurer ce déplacement est de mettre une graduation sur fond blanc bien éclairée *en avant* de l'électroscope, dans une position telle qu'en la regardant par réflexion sur le verre qui ferme la cage, on voit son image se former dans le plan où se déplace la feuille mobile. — Les observations seront plus faciles si l'on met un fond noir en arrière de l'électroscope (129).

— On peut aussi appliquer contre le fond de la cage une feuille de papier sur laquelle on a tracé un quart de circonférence ($R = 4^{\text{cm}}$) divisé au compas en parties égales ($l = 0^{\text{cm}}, 5$). On se place à une distance déterminée (50^{cm}) en avant de l'électroscope, de manière que l'image de l'œil dans le verre protecteur semble se projeter sur le point d'attache de la feuille mobile. On ajuste alors l'arc de circonférence gradué de façon que son centre se projette en ce même point et que la feuille mobile apparaisse au zéro de la graduation.

— Pour des expériences de cours, on supprime toute graduation, et l'on projette sur un écran l'image ou même l'ombre de la feuille mobile. On se servira directement, pour cette projection, de la



source lumineuse quasi-punctuelle placée dans la lanterne de projection dont on aura retiré le condenseur (64, 131).



Électroscope condensateur. — Se procurer deux plaques de *laiton plané* ($10^{\text{cm}} \times 10^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}}, 2$). Arrondir à la lime les arêtes et les angles des deux plaques et souder au centre de chacune d'elles un petit tube de *laiton* ($l = 3^{\text{cm}}$). L'un de ces tubes aura un diamètre intérieur juste suffisant pour pouvoir se monter sur la tige de l'électroscope. L'autre tube sera un peu plus large ($d = 0^{\text{cm}}, 9$) et l'on y mastiquera une baguette de *verre* ($d = 0^{\text{cm}}, 8$, $l = 25^{\text{cm}}$). Les deux plateaux sont ensuite vernis sur leur face libre.

Dans tout ce travail, et surtout au moment de faire les soudures, il faut éviter de trop chauffer les plaques de métal plané pour ne pas les déformer.

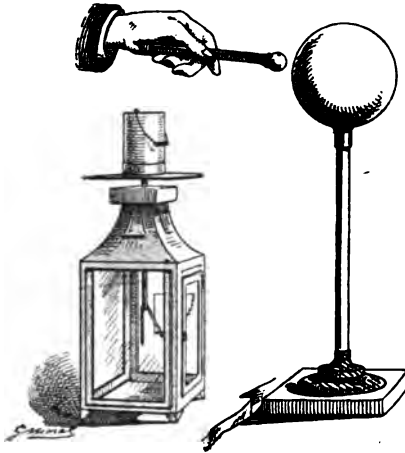
POTENTIEL. EMPLOI DE L'ÉLECTROSCOPE A FEUILLE D'OR COMME ÉLECTROMÈTRE.

Dans toutes les expériences où la charge d'un conducteur isolé doit être invariable, il faut éviter d'opérer au voisinage d'une machine électrique d'où s'échappent des aigrettes. Les charges libres que produisent ces aigrettes viendraient, en effet, charger ou décharger irrégulièrement le conducteur isolé (VII, 52).

15. Graduation d'un électroscope. — Monter un plateau sur la tige de l'électroscope à feuille d'or (VII, 14). Poser sur ce plateau un petit seau cylindrique en fer-blanc (*jouet*; $h = 7^{\text{cm}}$). Si le plateau est verni, on assure la connexion métallique du seau cylindrique avec la tige de l'électroscope au moyen d'un fil de cuivre ou d'une bande de papier d'étain. — Placer, d'autre part, une grosse boule métallique ($d > 10^{\text{cm}}$), ou un ballon de

verre ($V = 2^1$) recouvert de papier d'étain (**VII, 23**) sur un très bon support isolant, une plaque de paraffine, par exemple.

Charger assez fortement cette boule avec l'électrophore ou avec la machine. Toucher la boule avec un *corps d'épreuve* (**VII, 10**).



Toucher ensuite le fond du seau métallique avec le corps d'épreuve chargé pour en *vider* la charge sur l'électroscope. Noter alors la déviation de la feuille d'or.

Répéter l'expérience en touchant la grosse boule au même point et apporter sur l'électroscope une deuxième charge, qui s'ajoute à la première. Noter la nouvelle déviation et continuer de la même manière à augmenter la charge de l'électroscope.

Les charges que l'on apporte ainsi successivement seraient toutes égales et la courbe que l'on déduit de ces expériences donnerait les valeurs de la charge de l'électroscope en fonction de la déviation (¹), s'il n'y avait pas de déperditions et si, dans chaque expérience, le corps d'épreuve n'empruntait à la grosse boule qu'une fraction négligeable de sa charge. Mais, pour ces deux raisons, il peut y avoir lieu de modifier la courbe obtenue.

Déperditions. — Les expériences précédentes auront dû être

(¹) En raison des déplacements de la feuille d'or, la charge de l'électroscope n'est pas exactement proportionnelle à la différence de potentiel entre la cage et la tige et il peut y avoir lieu d'augmenter la *capacité* de cet appareil au moyen d'un condensateur auxiliaire (**VII, 35**).

faites aussi rapidement que possible pour réduire les déperditions au minimum.

Pour se rendre compte de l'importance de ces déperditions, on répète les expériences en les espaçant davantage.

En mesurant les nouvelles déviations de la feuille d'or et en les comparant aux déviations obtenues dans les premières expériences, on pourra déterminer, s'il y a lieu, un facteur de réduction au moyen duquel on ramènera les mesures faites à ce qu'elles auraient été s'il n'y avait eu aucune déperdition.

Les expériences ne devront être conservées que si la correction à faire est très faible.

Partage de la charge entre la boule électrisée et le corps d'épreuve. — Électriser la boule qui sert de source d'électricité. Toucher cette boule avec le corps d'épreuve et porter sur l'électroscope la charge qu'il emporte.

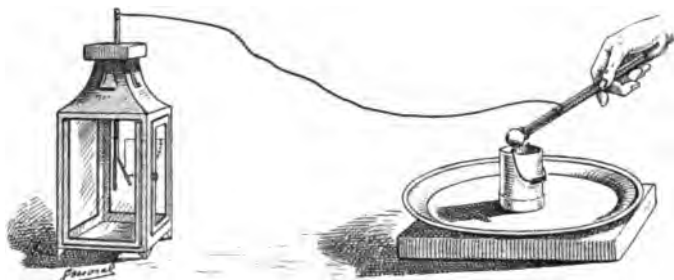
Aussitôt la mesure faite, toucher de nouveau la boule électrisée avec le corps d'épreuve et décharger immédiatement ce corps d'épreuve en le mettant au sol, puis toucher encore la boule, décharger le corps d'épreuve et ainsi de suite une dizaine de fois, en opérant aussi vite que possible. Toucher enfin une dernière fois la boule électrisée et porter la charge du corps d'épreuve sur l'électroscope préalablement déchargé.

Quelle est, d'après ces expériences, la fraction de sa charge que le corps d'épreuve emporte à la boule électrisée? Les corrections à faire, de ce chef, dans la graduation de l'instrument, sont-elles du même ordre de grandeur que celles qui résultent des déperditions? Est-il nécessaire de répéter les mesures en augmentant la capacité de la boule au moyen d'un condensateur auxiliaire? (VII, 36).

16. Constance du potentiel sur la surface d'un conducteur. — Préparer un corps d'épreuve fait d'une boule métallique (bouton de livrée déverni; $d = 1^{\text{cm}}, 8$), à laquelle on attache un fil de cuivre fin ($l = 100^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 05$). Mastiquer cette boule à l'extrémité d'un bâton de cire à cacheter ou, à la rigueur, au bout d'une baguette de verre ($l = 30^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 6$), que l'on aura lavée, séchée et paraffinée. — Placer d'autre part des objets quelconques, tels qu'une assiette de fer-blanc et un petit seau métallique, sur une plaque de paraffine ou de diélectrine.

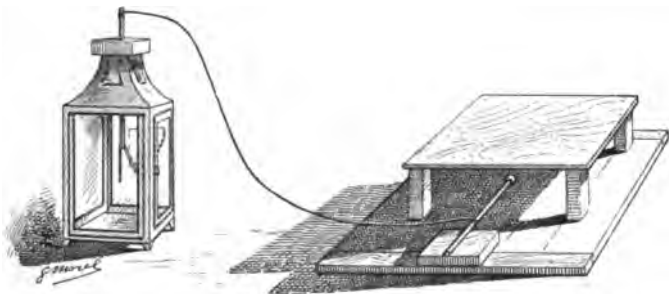
Attacher l'extrémité du fil de cuivre à la tige de l'électroscope,

qu'on éloigne à quelque distance, puis charger modérément le conducteur isolé. En déplaçant le corps d'épreuve sur toute la surface de ce conducteur, on constatera que la déviation de l'élec-



troscopie reste constante, même quand le contact est pris au fond de la cavité duseau métallique où il n'y a cependant aucune charge (38, 100).

17. Surfaces équipotentielles. — *Montage.* — Préparer un condensateur plan formé d'une planche à dessin et d'une planche de sapin plus petite (22^{cm}; 33^{cm}), dont on a poli la surface avec du papier de verre. La petite planche repose sur la grande par le moyen de quatre piliers de paraffine (7^{cm}; 3^{cm}; 2^{cm}) que l'on peut faire tenir avec de la cire molle ou un mastic fusible (I, 92).



Préparer aussi une boule d'épreuve reliée à un électroscope gradué, placé à 1^m ou 2^m de distance, comme pour l'expérience précédente.

Expériences. — Charger modérément le plateau isolé du condensateur et placer la boule d'épreuve en un point du champ. Le potentiel indiqué par l'électroscope est proportionnel au potentiel de ce point.

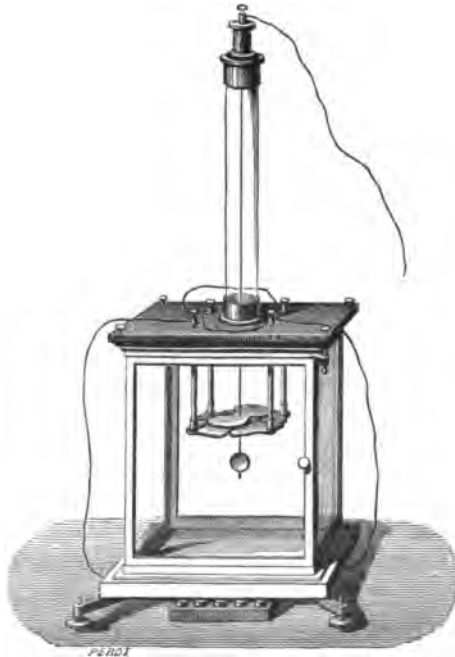
Fixer ensuite le manche de la boule d'épreuve sur un bloc de bois rectangulaire (5^{cm} ; 5^{cm} ; 2^{cm}), poser ce bloc de bois sur la planche à dessin; puis déplacer la boule d'épreuve dans un plan horizontal entre les armatures du condensateur.

La déviation de l'électroscope est-elle sensiblement constante? Le plan que décrit le centre de la boule est-il sensiblement une surface équipotentielle?

On cherchera enfin à décrire avec la boule d'épreuve une surface équipotentielle complète et l'on reconnaîtra qu'elle entoure complètement le plateau isolé.

On constatera aussi que les surfaces équipotentielles se rapprochent beaucoup de la surface de ce plateau dans le voisinage des bords. On sait en effet que c'est là que la densité électrique est maxima (**VII, 10**), et que la densité électrique varie en raison inverse de l'écartement des surfaces équipotentielles.

18. Électromètre à quadrants. — L'électroscope à feuille



d'or n'apprécie que des différences de potentiel de l'ordre de grandeur des centaines de volts. On peut opérer avec des potentiels de

l'ordre de quelques volts en se servant d'un *électromètre à quadrants*.

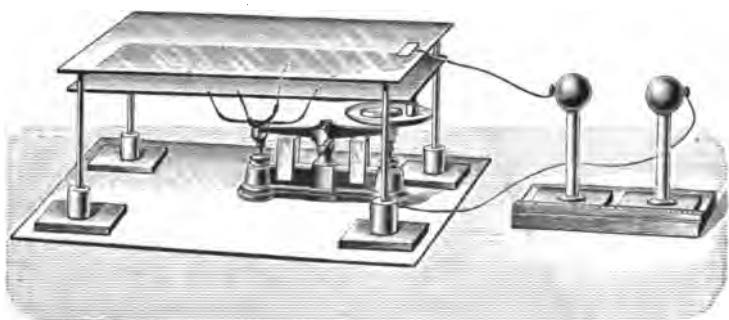
— On peut construire soi-même cet appareil avec des quadrants en carton ou en papier d'étain collé sur verre. L'aiguille est découpée dans de la feuille d'aluminium ou dans du papier bristol argenté. Il est nécessaire d'employer pour la suspension de l'aiguille un fil métallique assez fin, de moins d'un dixième de millimètre de diamètre (64, 106 bis).

ÉLECTROMÈTRE BALANCE ET POTENTIELS EXPLOSIFS.

19. Electromètre balance. — Prendre une petite balance de Roberval, *de construction soignée* ($F = 500^g$), dévisser l'aiguille et le cadran et fixer sur le socle deux butoirs qui ne permettent au fléau que des oscillations de quelques millimètres d'amplitude. Ces butoirs peuvent être constitués par des lames de laiton battu (15^{cm} ; 3^{cm} ; 0^{cm} , 15), repliées en Π et formant ressorts.

Retirer l'un des plateaux de la balance et souder quatre tiges métalliques ($l = 8^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}$, 2) sur la griffe qui le portait. Ces tiges, qui montent obliquement, serviront de support au plateau mobile de l'électromètre.

Pour constituer le plateau mobile, prendre une plaque d'aluminium (45^{cm} ; 25^{cm} ; 0^{cm} , 2). Arrondir les angles et les arêtes et



faire dresser cette plaque de manière à la rendre aussi plane que possible (*métal plané*). Le plateau fixe est formé d'une plaque de zinc (45^{cm} ; 35^{cm} ; 0^{cm} , 2), dont on arrondit aussi les angles et les arêtes et que l'on fait *planer* comme le plateau fixe.

Le plateau fixe repose sur quatre supports isolants constitués, par exemple, par des baguettes de verre ($l = 16^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 8$), bien nettoyées, puis paraffinées à chaud. Ces baguettes sont entrées à frottement dur dans des trous percés dans de forts bouchons ($h = d = 4^{\text{cm}}$) fixés eux-mêmes à l'arcanson sur des planchettes de bois (10^{cm} ; 10^{cm} ; 1^{cm}).

Pour monter l'électromètre, on met la balance sur un grand carreau de verre (48^{cm} ; 48^{cm} ; $0^{\text{cm}}, 2$) et l'on pose le plateau d'aluminium sur le support qu'on lui a préparé. On courbe plus ou moins les tiges de ce support, de manière que le plateau soit horizontal, ce que l'on reconnaît aisément en se servant d'une bille ou d'un niveau.

On place ensuite le plateau de zinc sur ses quatre colonnes isolantes et l'on règle la hauteur de ces supports de façon que ce deuxième plateau soit, en tous ses points, éloigné du plateau inférieur d'une distance de 3^{cm} (diamètre d'une pièce de 10 centimes).

On met, enfin, dans le plateau libre de la balance un contre-poids un peu moins lourd que le plateau d'aluminium.

20. Micromètre à étincelles. — Prendre deux boules en laiton (boules d'escalier; $D = 5^{\text{cm}}$). Sur le côté de chacune d'elles souder un petit bouton en laiton (boutons de livrée; $d = 1^{\text{cm}}$). Mastiquer ensuite ces boules sur des éprouvettes à pied ($V = 15^{\text{cm}}$; $h = 12^{\text{cm}}$) et fixer ces éprouvettes elles-mêmes avec de l'arcanson, sur des planchettes de bois (10^{cm} ; 6^{cm} ; 1^{cm}).

Préparer une planche plus grande, bien dressée (25^{cm} ; 10^{cm} ; 2^{cm}), sur laquelle on cloue une règle carrée portant une division en millimètres. Les planchettes qui portent les boules sont alors posées le long de cette règle, et l'une d'elles est clouée sur la planche.

21. Mesure des potentiels explosifs. — *Montage.* — Disposer le micromètre à étincelles et l'électromètre balance près de la machine électrique. Relier métalliquement l'axe de la machine, le socle de la balance et l'une des boules du micromètre. Relier aussi l'autre boule du micromètre à l'un des pôles de la machine et au plateau supérieur de l'électromètre.

Ces connexions peuvent être établies avec des fils de cuivre ($d = 0^{\text{cm}}, 1$); il faut seulement avoir soin d'en replier les extrémités en forme de boucle, et il peut être bon de les protéger sur leurs parcours par des tubes de verre, afin d'éviter la production des aigrettes et les déperditions d'électricité.

Expériences. — Prendre le *zéro* du micromètre à étincelles en amenant ses boules au contact. Ceci fait, éloigner les boules, régler le contrepoids de l'électromètre balance de manière qu'il soit plus léger que le plateau d'aluminium d'une quantité déterminée, 5^s par exemple, et mettre la machine en marche, mais très doucement, afin que les potentiels s'élèvent très lentement.

L'expérience consiste à placer les boules du micromètre à étincelles à une distance telle que la balance bascule juste au moment où une étincelle va éclater. On mesure alors la distance des boules. On recommence ensuite l'expérience en portant à 10^s, puis à 20^s, à 40^s et 80^s la valeur que doit atteindre l'attraction électrique.

De la mesure des dimensions de l'électromètre, on déduira la valeur de la différence de potentiel correspondant à chaque distance explosive. Ces deux quantités restent-elles sensiblement proportionnelles ?

22. Dissymétrie de la machine. — Supprimer le micromètre à étincelles et rapprocher les boules de l'excitateur de la machine à une distance d'environ 2^{cm} ou 3^{cm}. Mesurer avec l'électromètre la différence de potentiel qui existe au moment de l'étincelle entre l'axe de la machine et l'un ou l'autre des deux pôles. Les valeurs numériques de ces différences de potentiel sont-elles égales ?

INFLUENCE.

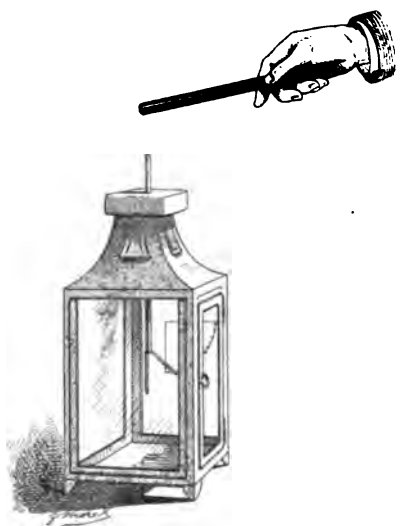
23. Montage. — Prendre deux ballons à col court ($V = 1$ litre), *suffier* leur surface et les recouvrir avec du papier d'étain ($e = 0^{\text{cm}}, 001$) que l'on aura coupé en bandes larges d'environ 2^{cm}.

Fermer ces ballons par des bouchons de liège et les fixer sur des supports isolants faits d'un pilier de paraffine (3^{cm}; 2^{cm}; 7^{cm}) reposant sur une planchette (12^{cm}; 12^{cm}; 1^{cm}). Pour faire tenir la paraffine, il suffit de faire couler un mastic fusible sur le bouchon ou sur la planchette et de poser le pilier de paraffine sur ce mastic fondu.

Monter de la même manière un seau en zinc ($h = D = 23^{\text{cm}}$) sur trois petits piliers de paraffine. — Fixer, d'autre part, des boules creuses en laiton ($D = 3^{\text{cm}}$) à l'extrémité de deux bâtons de cire à cacheter. — Préparer enfin un corps d'épreuve muni d'un

fil fin permettant de le relier à l'électroscope, comme dans une expérience précédente (**VII, 16**).

24. Influence sur l'électroscope. — Électriser un bâton



d'ébonite ou de cire à cacheter et une baguette de verre et reconnaître le signe de leurs charges avec un électroscope à balle de sureau (**VII, 5**).

Approcher l'un de ces corps de la tige de l'électroscope. La feuille d'or dévie-t-elle?

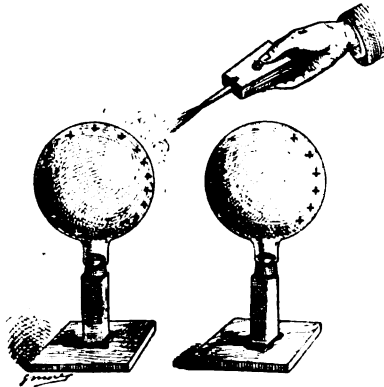
— Charger l'électroscope par contact soit avec la résine, soit avec le verre électrisé de manière à avoir une déviation modérée. Comment varie cette déviation quand on approche lentement de la tige de l'électroscope le bâton de verre ou le bâton de résine?

— Frapper avec la peau de chat un corps conducteur isolé et l'approcher de l'électroscope chargé positivement. Quel est le signe de la charge de ce conducteur?

— Inversement, ayant chargé l'électroscope d'une manière quelconque, approcher le bâton de résine électrisé. D'après les mouvements de la feuille d'or, quel est le signe de la charge que porte l'appareil?

— Analyser le détail des phénomènes qui se produisent quand, ayant posé l'électroscope sur une plaque de paraffine, on charge ou l'on décharge soit la tige, soit la cage de l'instrument (201).

25. Influence sur un corps isolé. — Placer à quelques centimètres l'un de l'autre les deux ballons dont on a rendu les surfaces conductrices (VII, 23) et charger modérément l'un d'eux.



On peut, par exemple, le charger positivement en le touchant avec le plateau de l'électrophore (VII, 34).

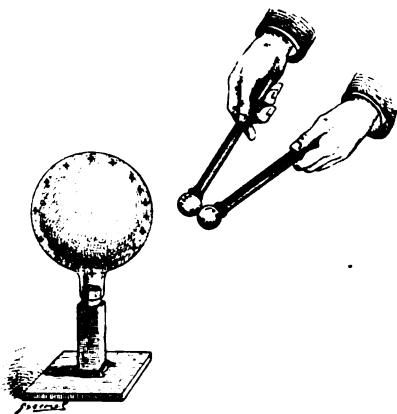
Étudier la distribution électrique sur la sphère chargée et sur la sphère influencée en prenant comme corps d'épreuve l'une des boules de 3^{cm} que l'on a préparées (VII, 23). Trouve-t-on sur la sphère influencée une région positive et une région négative? Y a-t-il une ligne neutre?

Si l'isolement est suffisant pour que l'on ait pu charger fortement la sphère isolée, on reconuaitra le signe des charges sur les deux corps en y projetant, au moyen d'un petit soufflet, un nuage d'un mélange de *fleur de soufre* et de *minium* en poudre. Les régions chargées positivement deviendront jaunes et les régions chargées négativement deviendront rouges (41).

— Répéter une expérience analogue en électrisant leseau métallique isolé que l'on a préparé et en maintenant la boule isolée à l'intérieur de ce conducteur creux sans que les deux corps se touchent. Trouve-t-on encore sur la surface de la boule des charges développées par influence?

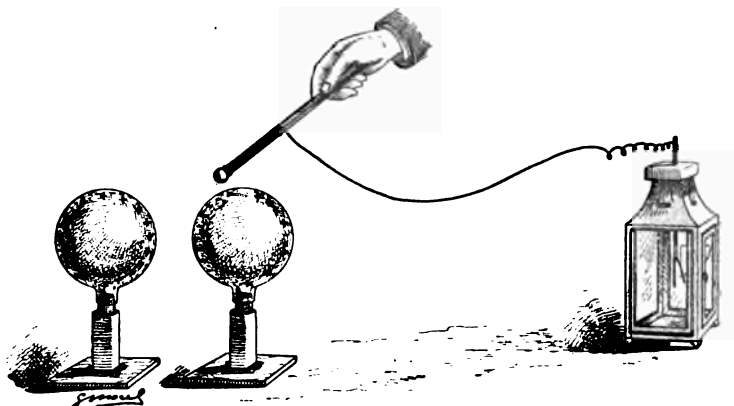
Équivalence des charges positive et négative développées par influence. — Prendre les deux boules de laiton de 3^{cm} de diamètre et les rapprocher de la grosse sphère chargée, en les tenant par leurs manches isolants. Mettre ces deux boules en contact, la ligne des centres dirigée vers le centre de la sphère chargée,

c'est-à-dire dans la direction de la ligne de force du champ. Séparer ensuite les deux boules et mesurer leurs charges avec l'électroscope (VII, 10). Ces charges sont-elles de signes con-



traires? Sont-elles équivalentes? (73, 100, 118, 146). Obtient-on encore les mêmes résultats si la ligne des centres des deux boules en contact est orientée perpendiculairement à la direction du champ? (100, 118).

26. Potentiels. — Prendre maintenant le petit corps d'épreuve relié à l'électroscope par un fil fin et étudier la distribution du

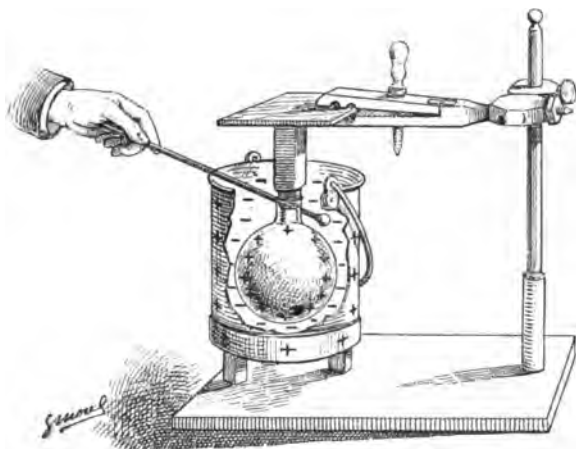


potentiel au voisinage des deux conducteurs et sur ces deux corps (VII, 16).

Le potentiel du corps influencé est-il le même, quel que soit

le point touché par le corps d'épreuve? Ce potentiel est-il le même que celui du corps chargé, ou bien est-il intermédiaire entre ce dernier potentiel et celui des parois de la salle? Le potentiel du corps chargé baisse-t-il quand on approche le corps influencé? (100, 175).

27. Influence à l'intérieur d'un conducteur creux. — Placer le seau isolé sur la table. Placer la sphère chargée à l'in-



térieur du seau en la tenant renversée au moyen d'un support auxiliaire.

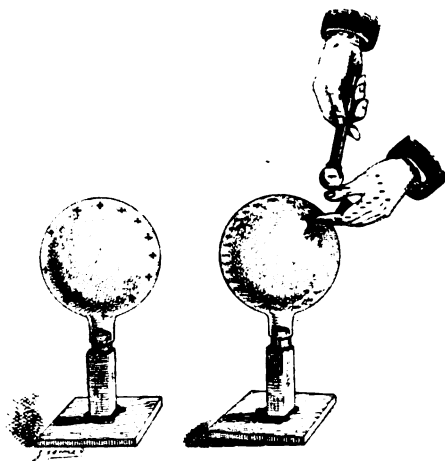
Étudier comme précédemment la distribution électrique à la surface du seau métallique. Le signe de la charge est-il le même sur toute la surface intérieure? La répartition de la charge intérieure change-t-elle quand on déplace d'abord la boule chargée dans le seau, puis quand cette boule vient à toucher la paroi? Quel est le signe des charges extérieures? Leur répartition change-t-elle quand la boule chargée se déplace et quand elle touche la paroi?

— Répéter l'expérience en mettant le seau isolé en communication avec la tige de l'électroscope. La déviation de la feuille d'or varie-t-elle quand on déplace la boule chargée à l'intérieur du seau, puis quand on décharge cette boule en lui faisant toucher les parois?

— Déterminer encore la répartition des potentiels (**VII, 16**) et voir, en particulier, comment varient les potentiels du corps

chargé et du corps influencé quand on déplace la boule chargée dans le conducteur creux jusqu'à établir le contact (100).

28. Influence sur les conducteurs en communication avec les parois de la salle. — Charger une sphère conductrice portée par un pied isolant ($V = 1$ litre). Chercher avec la



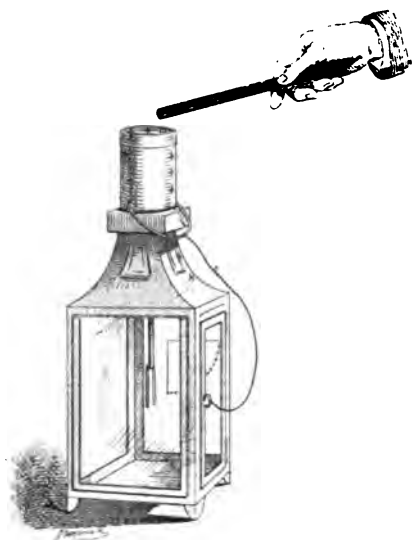
boule d'épreuve s'il existe des charges sur les parois de la salle et sur les corps en communication avec elles (table, mur, corps de l'observateur, boule isolée qu'on touche avec le doigt, etc.). Tous ces corps fonctionnent-ils comme des conducteurs? Les charges trouvées sont-elles toutes de signe contraire à celle de la sphère isolée?

— Si l'on charge fortement la sphère isolée et si on l'approche d'un mur, on pourra, aussi, constater qu'un pendule à balle de sureau *isolée* est attiré par le mur aussi bien que par la sphère électrisée (64).

29. Écrans électriques. — Recouvrir la tige de l'électroscope avec un petit seau (*jouet*, $h = d = 7^{\text{cm}}$) qui ne la touche pas et qu'on met en communication métallique avec la cage.

Faire reposer la cage de l'électroscope sur une plaque de paraffine, ou bien la mettre en communication avec le sol. Dans les deux cas, approcher de l'électroscope un corps fortement chargé. L'électroscope dévie-t-il? Obtient-on même une déviation si l'on charge fortement la cage de l'électroscope? (VII, 8). L'effet

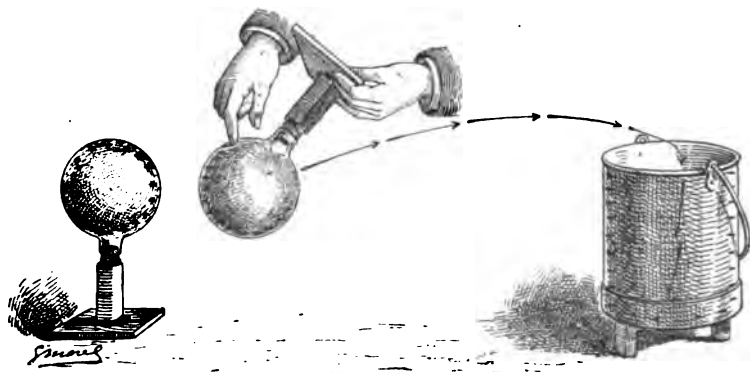
d'écran électrique se produirait-il encore si le petit seau qui



recouvre la tige de l'électroscope n'était pas en communication avec la cage (100, 201)?

PRINCIPE DES MACHINES ÉLECTRIQUES.

30. Principe des machines à influence à addition. — Approcher une boule isolée d'un conducteur chargé. Toucher la



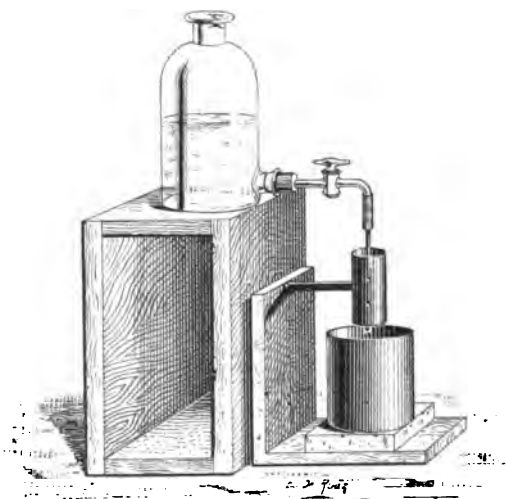
boule avec le doigt, puis la transporter dans un seau isolé (VII, 23)

et lui en faire toucher le fond pour y *vider* la charge que la boule apporte. Répéter cette expérience plusieurs fois de suite en opérant assez vite pour que les déperditions soient peu importantes.

La charge de la première sphère, mesurée à l'électroscope, se trouve-t-elle altérée par ces expériences? — La charge du seau isolé augmente à chaque opération; si ce seau communique avec la tige de l'électroscope, voit-on le potentiel augmenter en progression arithmétique?

31. Machine à addition à écoulement d'eau. — Montage.

— Prendre un vase de verre tubulé en bas ($V = 2$ litres) et munir la tubulure d'un petit robinet. Adapter à ce robinet un tube de



verre vertical ($l = 6^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}},6$), en faisant la jonction au moyen d'un tube de caoutchouc (feuille anglaise $D = 0^{\text{cm}},6$).

Couper un tube de laiton ($l = 8^{\text{cm}}$, $d = 4^{\text{cm}}$). Préparer un support fait de deux planchettes clouées à angle droit (20^{cm} ; 10^{cm} ; $1^{\text{cm}},5$) et fixer verticalement le tube de laiton devant ce support par l'intermédiaire d'un bâton de cire à cacheter horizontal ($l = 5^{\text{cm}}$).

Poser le vase tubulé sur un support (caisse en bois, $h = 30^{\text{cm}}$) et disposer le cylindre de laiton de façon que l'extrémité inférieure du tube de verre se place au centre du cylindre.

Mettre un vase métallique ($10^{\text{cm}} \times 10^{\text{cm}}$) sur une plaque de paraffine en dessous du cylindre de laiton, et relier métalliquement ce vase avec la tige de l'électroscope.

Expériences. — Mettre le cylindre de laiton en communication métallique avec l'eau du vase tubulé et faire écouler l'eau goutte à goutte. L'électroscope se charge-t-il?

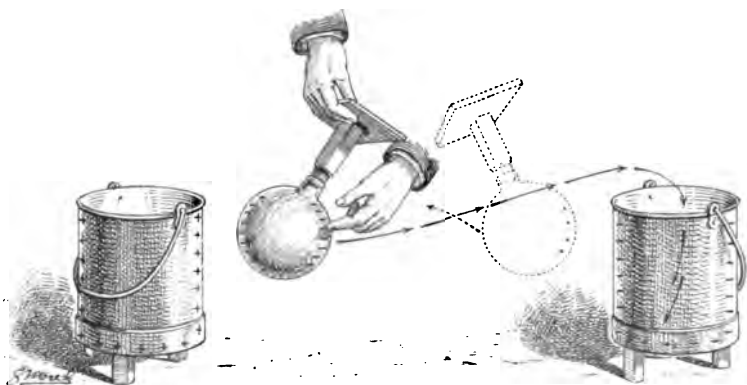
Isoler le cylindre de laiton et le charger légèrement avec l'électrophore (VII, 34). L'électroscope se charge quand l'eau s'écoule. Quel est le signe de sa charge? Reste-t-il chargé quand on décharge le cylindre et qu'on continue à laisser couler l'eau? Le résultat de ce dernier essai reste-t-il le même quand on éloigne le cylindre de laiton?

— Charger faiblement le cylindre de laiton, en le mettant, par exemple, en relation avec l'un des pôles d'une batterie de piles ou d'accumulateurs de quelques dizaines de volts, dont l'autre pôle communique avec l'eau qui s'écoule.

Faire écouler l'eau goutte à goutte, assez lentement pour que ces gouttes puissent être aisément comptées. Constater que l'électroscope dévie progressivement et construire la courbe représentant les variations de la déviation en fonction du nombre des gouttes écoulées. Cette courbe de graduation de l'électroscope est-elle la même que celle que l'on a établie par un autre procédé? (VII, 15).

Changer ensuite le potentiel de charge du cylindre de laiton. La charge communiquée à l'électroscope par un même nombre de gouttes est-elle proportionnelle à ce potentiel (100, 149)?

32. Principe des machines à influence à multiplication.



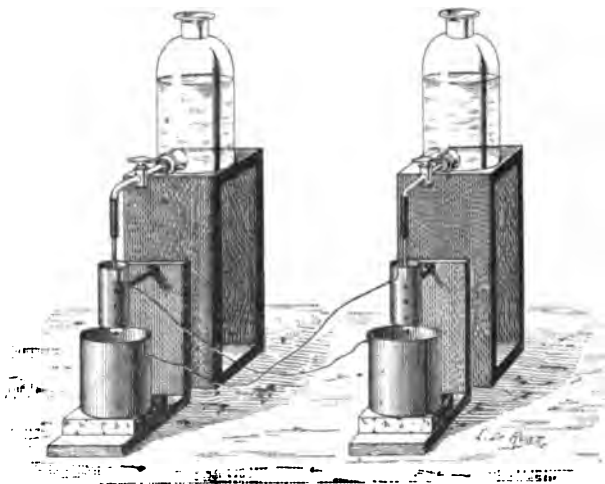
— Placer deux seaux métalliques sur des supports isolants (VII, 23) et charger modérément l'un d'eux.

Prendre d'autre part une sphère isolée ($V = 1$ litre), l'approcher du seau chargé et la toucher avec le doigt, puis *vider* sa charge

dans le deuxième seau. Charger ensuite cette sphère par influence au moyen de ce deuxième conducteur et *vider* la charge obtenue dans le premier conducteur creux.

On répétera plusieurs fois cette double opération, et l'on se rendra compte à chaque opération, avec un corps d'épreuve et un électroscope, de la manière dont les charges varient, tant sur les conducteurs creux que sur la sphère isolée qui sert au transport des charges.

33. Machine à multiplication à écoulement d'eau. — Disposer deux appareils à influence semblables à celui que nous avons décrit plus haut (**VII, 31**). Relier le cylindre du premier appareil avec le vase qui recueille l'eau dans le second, et relier le



cylindre de ce deuxième appareil avec le vase qui recueille l'eau dans le premier.

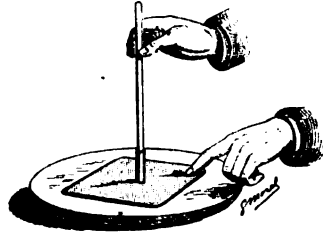
Décharger les deux appareils et faire écouler l'eau. Mettre, l'un après l'autre, ces deux appareils en communication avec l'électroscope et constater que les appareils ne se chargent pas.

Charger ensuite l'un des cylindres isolés, avec l'électrophore par exemple (**VII, 34**), et faire écouler l'eau dans les deux appareils. Ces deux appareils se chargent. Quels sont les signes de leurs charges? Les potentiels, déduits de la graduation de l'électroscope, augmentent-ils en progression arithmétique avec le nombre de gouttes qui s'écoulent, ou bien augmentent-ils en progression géométrique (100, 149)?

34. Construction d'un électrophore. — Couler de la diélectrine (I, 79) ou de la paraffine dans un moule quelconque tel qu'une boîte en bois ($h = 1^{\text{cm}}$), un plateau de fer battu ($D = 20^{\text{cm}}$), ou une assiette de faïence. — Au lieu de ces isolants, on peut aussi fondre à 108° - 110° un mélange à parties égales de résine, de gomme laque et de térébenthine de Venise. On maintient le mélange fondu jusqu'à ce qu'il ne se dégage plus de vapeurs et l'on coule alors dans un moule (171).

Après refroidissement, on refond la surface avec la flamme d'un bec Bunsen, et on laisse définitivement la matière se solidifier.

Le disque conducteur de l'électrophore est formé par un plateau de fer battu qu'on trouve aisément dans le commerce, ou par une plaque de *zinc plané*. La largeur du plateau est prise inférieure d'environ 5^{cm} à celle de la plaque de diélectrique. Au centre de ce plateau, on soude un tube de laiton ($l = 3^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}$, 9) dans lequel on fixe une baguette de verre ($l = 30^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}$, 8) gommé-laqué ou paraffiné, ou, mieux encore, un bâton de cire à cacheter.




— Électriser le diélectrique en le frappant avec une peau de chat. Poser ensuite le plateau sur ce diélectrique, le toucher avec le doigt, puis retirer le doigt et soulever le plateau métallique en le tenant par le manche isolant.

Ce plateau est alors fortement chargé. On peut en tirer une étincelle de plusieurs millimètres de longueur. On reconnaîtra avec l'électroscope que cette charge et celle du diélectrique sont de signes contraires.

— On fait encore un excellent électrophore avec une lame de mica, ou même une lame de verre qu'on recouvre de papier d'étain (171).

CAPACITÉ D'UN CONDENSATEUR.

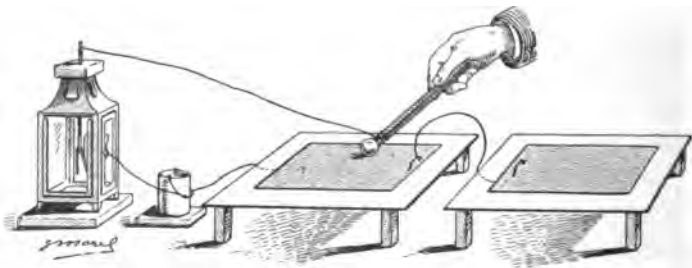
35. Proportionnalité des potentiels aux charges. — *Montage.* — Construire deux condensateurs formés chacun d'un carreau de verre (35^{cm} ; 35^{cm} ; 0^{cm} , 15) sur les deux faces duquel on

a collé des feuilles de papier d'étain (20^{cm} ; 20^{cm} ; $0^{\text{cm}},001$). La région du verre qui n'est pas recouverte de papier d'étain est paraffinée à chaud. On soude enfin sur chaque feuille d'étain une petite tige de cuivre ($l = 4^{\text{cm}}$, $d = 0^{\text{cm}},1$) recourbée en forme de  à laquelle on accrochera les fils de connexion.

Fixer d'autre part deux boules métalliques chacune à l'extrémité d'un bâton de cire à cacheter, leur attacher des fils de cuivre ($l = 50^{\text{cm}}$, $d = 0^{\text{cm}},03$) et attacher les autres bouts de ces fils de cuivre, l'un à la tige de l'électroscope à feuille d'or et l'autre à la cage de cet instrument.

Expériences. — Placer les deux condensateurs sur des pieds de paraffine ou de diélectrine et isoler de la même manière la cage d'un électroscope à feuille d'or.

Relier l'armature inférieure du premier condensateur par un fil de cuivre ($d = 0^{\text{cm}},03$) avec un objet métallique quelconque (conducteur n° 1) que l'on aura posé sur une plaque de paraffine. Relier l'autre armature à l'armature inférieure du second condensateur (conducteur n° 2) et laisser la dernière armature isolée (conducteur n° 3). Les appareils sont alors groupés comme le montre la figure ci-dessous.



Charger le conducteur n° 3 avec une machine électrique (**VII, 48**) ou un électrophore (**VII, 34**), pendant que l'on touche le conducteur n° 1 pour le mettre au potentiel des parois de la salle.

On a ainsi établi entre les conducteurs certaines différences de potentiel, savoir : A entre 1 et 2; B entre 2 et 3; et C entre 1 et 3. On a d'ailleurs (par définition)

$$A + B = C.$$

Mettre alors la cage et la tige de l'électroscope respectivement en communication avec les conducteurs n° 1 et n° 2 et commencer

par s'assurer que l'électroscope n'a pris qu'une faible fraction de la charge du condensateur. Pour cela, il suffit d'isoler l'électroscope, de le décharger et de le charger à nouveau : on doit retrouver presque exactement la même déviation de la feuille d'or.

Ceci fait, on prend dans la table de graduation de l'électroscope (VII, 15) le nombre a qui correspond à la déviation observée. D'après la manière dont cette graduation a été faite, *ce nombre mesure la charge de l'électroscope.*

Déterminer ensuite de la même manière et, par conséquent, avec la même unité, les mesures b et c des charges prises successivement par l'électroscope quand on en fait communiquer la cage et la tige, d'abord avec les conducteurs 2 et 3, puis avec les conducteurs 1 et 3.

Si la *capacité* de l'électroscope avait été constante au moment de la graduation, la propriété qu'il s'agit de démontrer devrait se traduire par la vérification de l'égalité

$$a + b = c.$$

Mais le déplacement de la feuille d'or augmente un peu cette capacité (¹), et la valeur de c que l'on observe peut présenter un léger écart par rapport à la somme de a et de b .

S'il en était ainsi, on devrait corriger les expériences qui ont fourni la graduation de l'électroscope (VII, 15). On répéterait donc ces expériences en augmentant beaucoup la partie invariable de la capacité de l'électroscope. Il suffirait pour cela de mettre les deux armatures de l'appareil en communication avec celles d'un condensateur tel que le condensateur cylindrique dont nous parlons ci-dessous — ou même avec deux fils de cuivre isolés un peu longs ($l = 100^{\text{cm}}$, $d = 0^{\text{cm}}, 03$).

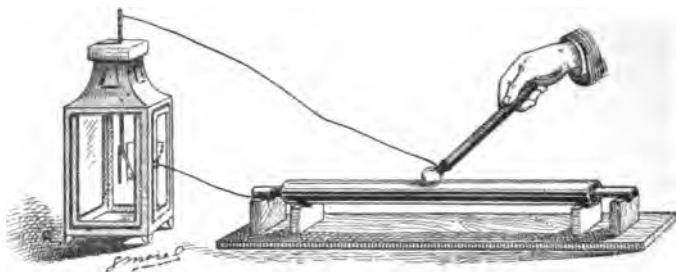
36. Mesure d'une capacité. Condensateur étalon. — On prendra comme étalon un condensateur cylindrique constitué par deux tubes de laiton ($e = 0^{\text{cm}}, 05$) dont les dimensions seront mesurées avec le *calibre à coulisse* (II, 13).

L'armature extérieure ($l = 50^{\text{cm}}$, diamètre intérieur = $2^{\text{cm}}, 5$) est fixée avec de la cire sur deux petits piliers de paraffine ($8^{\text{cm}}, 3^{\text{cm}}, 2^{\text{cm}}$) mastiqués eux-mêmes sur une planche ($60^{\text{cm}}; 10^{\text{cm}}; 1^{\text{cm}}$). L'arma-

(¹) L'augmentation de la capacité est égale au quotient du travail mécanique dépensé contre la pesanteur pour augmenter l'élévation de la feuille d'or, divisé par la moitié du carré du potentiel auquel se trouve chargé l'électroscope.

ture intérieure ($l = 56^{\text{cm}}$, diamètre extérieur $= 1^{\text{cm}}, 5$), qui sera en communication avec le sol, est portée par deux autres piliers de même grandeur, qui peuvent être en bois et vissés sur la planche.

L'armature intérieure est mobile. Quand on la met en place, on



la fixe sur ses supports avec un peu de cire molle dont on règle la position de manière que les deux cylindres aient même axe, ce qui se fait avec une précision très suffisante sans aucun appareil de réglage.

— On peut encore construire une bonne capacité étalon avec deux lames de *glace platinée*.

Capacité de l'électroscope. — Mettre la cage de l'électroscope en communication avec l'armature intérieure du condensateur étalon. Relier en outre une boule d'épreuve isolée ($d = 3^{\text{cm}}$) avec la tige de l'électroscope au moyen d'un fil de cuivre ($l = 100^{\text{cm}}$, $d = 0^{\text{cm}}, 03$).

Charger l'électroscope et mesurer sa déviation; puis toucher l'armature extérieure du condensateur étalon avec la boule d'épreuve reliée à l'électroscope. La déviation diminue et le rapport des potentiels, déduits de la graduation de l'appareil, permet de calculer le rapport de la capacité du condensateur étalon et de la capacité totale de l'électroscope de la boule métallique et du fil de communication.

On pourrait déterminer ensuite, de la même manière, le rapport des capacités de l'électroscope et des conducteurs accessoires qui lui sont reliés.

Capacité extérieure du condensateur étalon. — Dans l'expérience qui précède, les deux surfaces de l'armature extérieure du condensateur étalon se sont chargées. Elles forment condensateurs, l'une avec l'armature intérieure et l'autre avec le socle de l'appareil et leurs deux capacités s'ajoutent.

La première de ces capacités est seule connue en valeur absolue; on devra donc déterminer expérimentalement la capacité de la surface extérieure de l'armature extérieure.

A cet effet, on met la cage de l'électroscope en communication avec le socle du condensateur dont on a enlevé l'armature intérieure. On charge l'électroscope, comme dans l'expérience précédente, puis on touche le cylindre isolé avec la boule qui est reliée à la tige de l'électroscope. Le rapport des potentiels indiqués par cet appareil permet d'évaluer la capacité cherchée en fonction de celle de l'électroscope.

Capacités diverses. — La capacité de l'électroscope étant connue, on pourra déterminer une capacité quelconque en fonction de celle-ci, en opérant comme nous venons de le faire pour la capacité externe du condensateur étalon.

On déterminera ainsi la capacité d'une boule isolée, faite d'un ballon de verre ($V = 1^1$) recouvert de papier d'étain (**VII, 23**). Cette boule forme condensateur avec les parois de la salle. On s'assurera que sa capacité reste sensiblement constante quand on déplace la boule d'une manière quelconque loin des parois, mais que la capacité augmente quand on rapproche beaucoup la boule de la table ou du mur. — On constatera aussi que la capacité d'une boule isolée augmente avec son rayon.

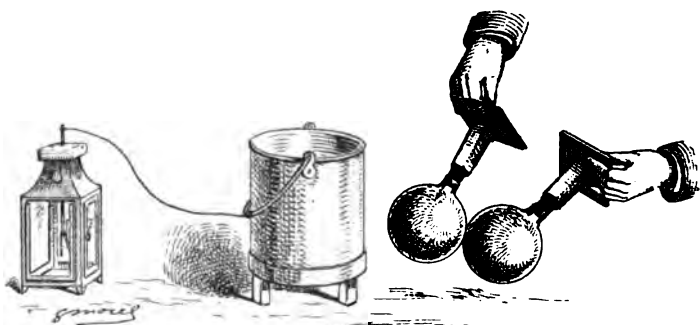
— En les comparant toujours à la capacité de l'électroscope on mesurera encore la capacité d'un fil isolé ou de deux fils parallèles ($l = 100^{\text{cm}}$) ou la capacité d'un carreau de verre un peu épais (20^{cm} ; 20^{cm} ; 0^{cm} , 3) recouvert de papier d'étain (5^{cm} ; 5^{cm} ; 0^{cm} , 001).

Batteries de condensateurs en surface et en cascade. — Au moyen de deux carreaux de verre semblables, on vérifiera que la capacité de deux condensateurs groupés *en surface* est la somme des capacités des condensateurs séparés. — On vérifiera, au contraire, que ce sont les inverses des capacités qui s'ajoutent si l'on groupe les condensateurs *en cascade*.

— Une expérience de ce genre consiste à étudier le partage d'une charge électrique entre deux boules isolées d'égal diamètre (ballons étamés, $V = 1^1$).

On charge l'une de ces boules avec l'électrophore (**VII, 34**). Pour mesurer la quantité d'électricité qu'elle porte, on se sert d'un électroscope relié à un seau métallique ($h = D = 23^{\text{cm}}$) isolé sur paraffine. On entre la boule dans le seau sans le toucher et

l'on note la déviation de la feuille d'or. Touchant ensuite la boule chargée avec une seconde boule semblable, on mesure séparé-

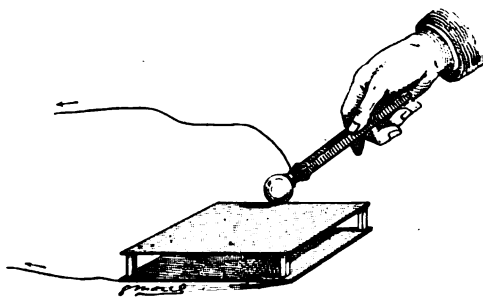


ment les charges des deux boules en les portant l'une après l'autre à l'intérieur duseau relié à l'électroscope. Ces charges sont-elles égales? Y a-t-il eu conservation de l'électricité (100, 175)?

— Si l'on doit étudier des capacités beaucoup plus grandes que celle de l'électroscope, il convient de prendre comme terme de comparaison une capacité du même ordre de grandeur. Il suffit pour cela d'augmenter la capacité de l'électroscope en reliant en permanence la tige et la cage de l'instrument de mesure aux deux armatures d'un condensateur à lame d'air isolé à la paraffine.

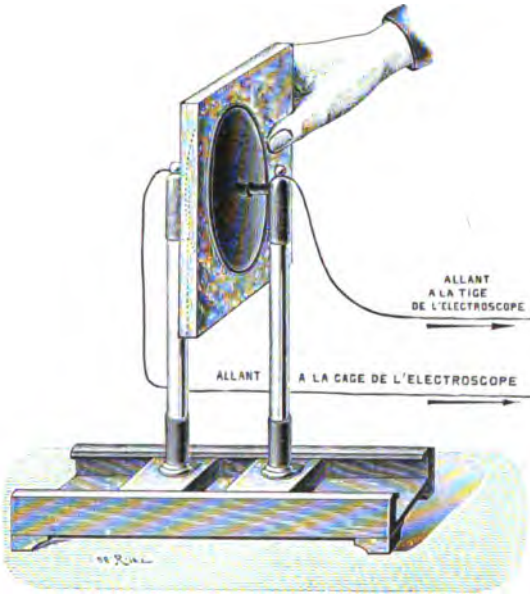
QUELQUES PROPRIÉTÉS DES DIÉLECTRIQUES.

37. Pouvoir inducteur spécifique de la paraffine. — Se procurer deux lames de *zinc plané* (10^{cm} ; 10^{cm} ; 0^{cm} , 2). Poser



l'une d'elles sur la table et placer l'autre au-dessus en les séparant par de petites cales de paraffine (1^{cm} ; 1^{cm} ; $h = 2^{\text{cm}}$).

Mesurer le rapport de la capacité de ce condensateur à la capacité de l'électroscope à feuille d'or par le procédé déjà décrit



(VII, 36) et vérifier que la capacité trouvée est indépendante du potentiel de charge.

Retirer ensuite les petites cales de paraffine et mettre une plaque de paraffine de même épaisseur (2^{cm}) entre les armatures du condensateur. Mesurer la nouvelle capacité.

La capacité du condensateur à lame de paraffine est-elle encore indépendante du potentiel de charge? Dans quel rapport la capacité s'est-elle trouvée accrue?

— Si l'on dispose d'un condensateur à plateaux verticaux bien isolés, on charge ce condensateur et l'on mesure son potentiel avec l'électroscope à feuille d'or. En glissant entre les armatures une plaque de paraffine qui ne les touche pas, leur différence de potentiel diminue comme si l'on avait rapproché les deux plateaux.

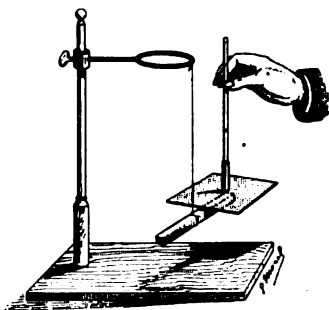
38. Forces exercées par le champ sur le diélectrique. — De l'essence de térébenthine placée dans un verre est attirée et s'élève en formant une sorte de petite trombe, si l'on approche de sa surface la boule positive de l'excitateur d'une machine

électrique (distance : 0^{cm}, 7). Le phénomène serait moins net avec l'autre pôle et l'on risquerait davantage qu'il se produise des aigrettes accompagnées d'un souffle électrique qui refoulerait le liquide au lieu de l'attirer (66, 182).

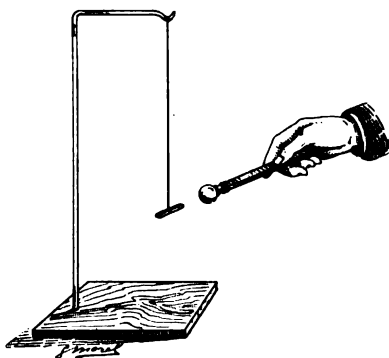


— Un barreau de paraffine (15^{cm} ; 1^{cm}, 5 ; 1^{cm}, 5) est suspendu par son milieu à un fil de soie très fin (*soie à dentelle*). On le place horizontalement à 2^{cm} ou 3^{cm} au-dessus de la table, puis on laisse le fil de soie se détordre de plusieurs tours jusqu'à ce que le barreau ne soit plus sensiblement entraîné par le fil.

Si l'on approche alors un plateau métallique chargé (électrophore) que l'on tient horizontalement au-dessus de l'une des extrémités du barreau de paraffine, on voit ce barreau se déplacer horizontalement et se fixer au-dessous du plateau chargé, comme s'il était attiré par la région où le champ est maximum (100).



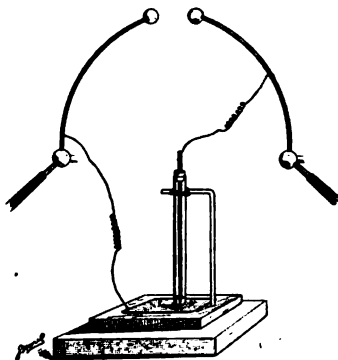
— Une petite aiguille de paraffine (3^{cm} ; 0^{cm}, 3 ; 0^{cm}, 3), suspendue à un fil de soie et placée dans un champ électrique, s'oriente dans la direction des lignes de force de ce champ. Ici le phénomène est



plus complexe, car si l'aiguille se trouve alors placée dans le champ maximum, cela tient à ce que l'électrisation produite par le champ sur l'aiguille (polarisation) produit à son tour un champ

de sens contraire au champ principal, et que ce champ de sens contraire serait plus grand dans toute autre position que dans la position actuelle.

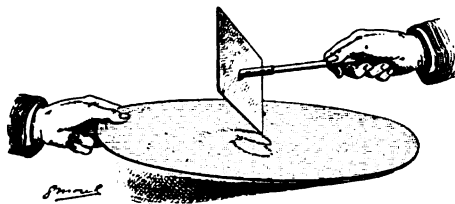
— *Perce verre.* — Sécher un tube à essais dans la flamme d'un bec Bunsen et y verser quelques gouttes de pétrole. Amener la pointe d'un fil métallique ($d = 0^{\text{cm}}, 2$) au fond du tube et poser ce tube sur une plaque de zinc ($10^{\text{cm}}, 10^{\text{cm}}$) en le soutenant au moyen d'une petite potence de verre. L'appareil sera enfin placé sur un support isolant.



Relier la plaque de zinc et la tige métallique aux deux pôles d'une machine électrique munie de ses condensateurs. Mettre la machine en marche, et en tirant des étincelles un peu fortes. A chaque étincelle, on voit le fond du tube à essais s'éclairer de lueurs dues à la décharge de l'électricité qui s'y était accumulée pendant la charge. Ces décharges locales répétées échauffent et altèrent le verre et, au bout d'un certain temps, brusquement le tube est percé par une étincelle (106 bis).

39. Pénétration des charges. — Prendre une plaque d'ébonite séchée à chaud et la passer dans la flamme d'un bec Bunsen ou d'une lampe à alcool pour enlever l'électrisation superficielle.

Frotter doucement l'ébonite afin de l'électriser négativement. Charger ensuite positivement un conducteur isolé (électrophore)



et promener ce conducteur sur l'ébonite comme si l'on voulait y tracer des caractères. On aura soin de tenir la plaque d'ébonite à la main et de ne pas la poser sur la table afin d'éviter que les phénomènes d'influence ne diminuent le potentiel dont on dispose.

Si l'on projette alors sur l'ébonite le mélange de fleur de soufre

A., II.

et de minium, les caractères que l'on a tracés apparaîtront en jaune sur fond rouge (66).

Figures électriques. — Mettre sur la table une feuille de papier paraffiné et poser dessus une pièce de monnaie. Mettre cette pièce de monnaie en communication avec l'un des pôles de la machine et maintenir le contact pendant quelques secondes.

Retirer ensuite la pièce de monnaie et projeter le mélange des poudres de minium et de soufre sur le papier paraffiné. On verra apparaître le relief avec ses moindres détails en rouge sur fond jaune ou en jaune sur fond rouge selon le signe des charges électriques utilisées.

Superposition des phénomènes. — Placer une feuille d'ébonite entre deux plateaux métalliques très notablement plus petits et charger le condensateur ainsi formé. On établit la charge avec une machine électrique ou avec une bobine d'induction, afin d'obtenir des potentiels extrêmement élevés et l'on maintient cette charge pendant près d'une minute.

L'essai fait avec le mélange de soufre et de minium fait apparaître la place des deux plateaux en rouge sur une face et en jaune sur l'autre (41).

En passant la lame d'ébonite dans une flamme, les charges superficielles disparaissent. On frotte alors avec une peau de chat la face qui était tout à l'heure positive; les poudres sensibles y laissent un dépôt rouge, montrant ainsi qu'elle s'est électrisée négativement. Mais, si l'on attend quelques instants, l'électrisation positive remonte à la surface et l'essai fait avec le mélange des poudres donne de nouveau un dépôt jaune (66).

40. Accumulation de l'énergie dans le diélectrique. — Si l'on charge un condensateur avec de très fortes différences de potentiel, presque toute la charge quitte les armatures pour s'accumuler sur le diélectrique.

L'expérience se fait avec un condensateur démontable. On charge le condensateur, puis on le démonte en le manœuvrant avec une tige isolante et l'on ne trouve plus qu'une très faible charge sur ses armatures. Si, ensuite, on remet les armatures en place, le condensateur fournira une forte décharge.

— On peut remplacer cet appareil classique par un simple carreau de verre un peu grand (48^{cm}; 48^{cm}). On le dessèche à chaud, puis, alors qu'il est encore tiède, on le place entre deux

plateaux métalliques ($D = 20^{\text{cm}}$), et l'on peut répéter l'expérience précédente (41).

— C'est à ce même phénomène que se rattachent les *décharges résiduelles* que fournit un condensateur à lame de verre. On



fera facilement l'expérience avec un carreau de verre (48^{cm} ; 48^{cm}) recouvert de papier d'étain (35^{cm} ; 35^{cm} ; 0^{cm} , 001). Au moment où l'on vient d'en tirer une étincelle, le condensateur n'est plus chargé, mais, quelques secondes plus tard, on peut en tirer une seconde étincelle, et plusieurs autres encore.

ÉNERGIE ÉLECTRIQUE.

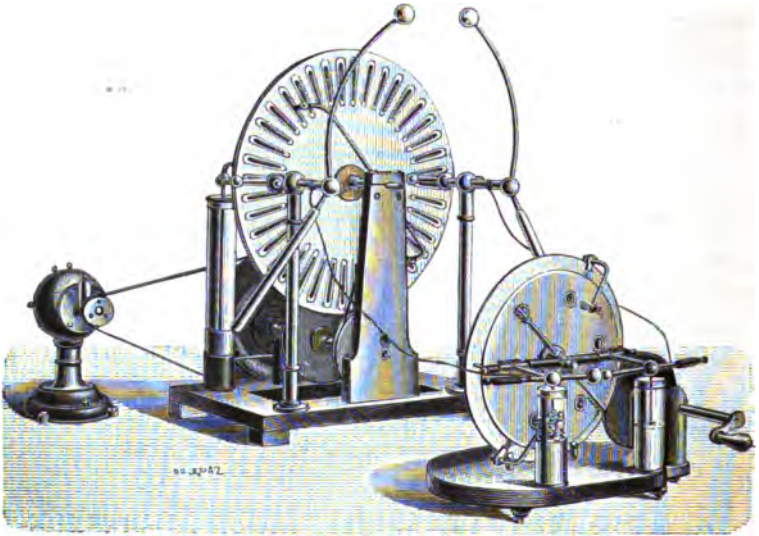
41. Transmission de l'énergie. Réversibilité des machines à influence. — Prendre comme génératrice une machine électrique un peu forte (machine à deux plateaux, $D = 45^{\text{cm}}$), et une machine *réceptrice* qui soit, de préférence, notablement plus faible (machine à un seul plateau, $D = 25^{\text{cm}}$).

Détendre la courroie de transmission de la machine réceptrice et relier les deux machines pôle à pôle par des tiges ou des fils métalliques ($d = 0^{\text{cm}}$, 1) ne touchant pas le sol. Ces fils pourront avoir une grande longueur (figure p. 196).

Mettre la génératrice en mouvement et donner une légère impulsion au plateau de la réceptrice, de manière qu'il commence à tourner à l'envers : sa rotation s'accélérera rapidement et la machine réceptrice continuera à tourner tant que la machine génératrice sera en mouvement.

Carillon électrique. — Attacher une petite boule creuse en laiton (bouton de livrée, $d = 1^{\text{cm}}$, 5) au bout d'un fil de soie. Prendre d'autre part deux conducteurs isolés que l'on met en com-

munication avec les pôles d'une machine électrique et suspendre



la boule mobile entre ces deux conducteurs, rapprochés à quelques centimètres de distance.

Si l'on met alors la machine en marche, le petit conducteur



mobile transporte les charges électriques en oscillant d'un con-

ducteur à l'autre. Une fois la machine arrêtée, le mouvement se continue tant qu'il reste entre les deux conducteurs une différence de potentiel de quelques milliers de volts.

— L'expérience réussira, naturellement, aussi bien si l'on relie les deux conducteurs isolés aux armatures d'un condensateur fortement chargé (100).

On pourrait aussi charger l'un des conducteurs avec l'électrophore, en mettant l'autre conducteur en communication avec le sol.

42. Énergie absorbée par la machine électrique génératrice. — Retirer les boules de l'excitateur pour favoriser les déperditions d'électricité par aigrettes et mettre la machine en marche au moyen d'un petit moteur électrique.

Mesurer la force électromotrice aux bornes du moteur et l'intensité du courant. Quelle est la puissance électrique totale utilisée par le moteur?

Tenir à la main l'axe du moteur pour l'empêcher de tourner, envoyer un courant de même intensité et mesurer la force électromotrice aux bornes du moteur. D'après cette mesure, quelle est la puissance qui se dissipe sous forme de chaleur dans les conducteurs électriques du moteur?

Pour déterminer toutes les autres pertes d'énergie, on fait ensuite tourner la machine électrostatique en mettant ses deux pôles en communication métallique, de façon qu'elle ne s'amorce pas.

On constate alors que le moteur marche presque *à vide* et qu'il s'emballerait si l'on ne réduisait pas l'intensité du courant. On règle donc ce courant de manière que la machine marche à la même vitesse que tout à l'heure, et l'on mesure encore l'intensité et la force électromotrice. Quelle est la puissance totale que l'on dépense maintenant? Quelle est la puissance dissipée sous forme de chaleur dans les conducteurs électriques du moteur?

D'après toutes ces mesures, quelle est la puissance que recevait la machine électrostatique dans la première expérience?

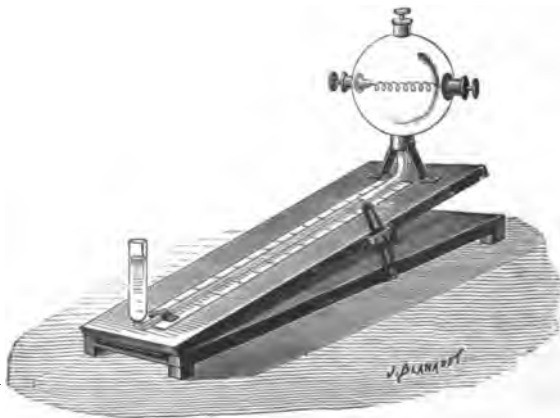
43. Mesure de l'énergie d'une décharge. — *Montage.* — Découper dans une feuille de verre à vitre ($48^{\text{cm}} \times 96^{\text{cm}}$) deux carreaux (48^{cm} ; 48^{cm}) sur les deux faces desquels on colle du papier d'étain (35^{cm} ; 35^{cm} ; 0^{cm} , 001). Bien nettoyer la surface du verre qui reste libre autour des armatures et, même, la recouvrir à chaud de paraffine ou d'un vernis à la gomme laque.

Poser les deux condensateurs l'un sur l'autre, en assurant le contact des armatures en regard au moyen de trois ou quatre bouts de tube de laiton ($l = 4^{\text{cm}}$; $d = 1^{\text{cm}}$) couchés entre les deux plateaux. Faire reposer le tout sur quatre piliers en paraffine (7^{cm} ; 2^{cm} ; 3^{cm}) mastiqués eux-mêmes sur des planchettes de bois ($5^{\text{cm}} \times 5^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}}$).

Souder d'autre part à des fils de cuivre ($d = 0^{\text{cm}}$, 1) trois petits disques de métal destinés à établir les connexions. Poser l'un d'eux sur l'armature supérieure en le maintenant avec un *poids* (200^g); mettre le second disque entre les armatures intermédiaires et le troisième entre l'un des piliers isolants et l'armature inférieure. Pour réduire les déperditions, on fera bien de passer les fils métalliques dans des tubes de verre jusqu'au delà des condensateurs.

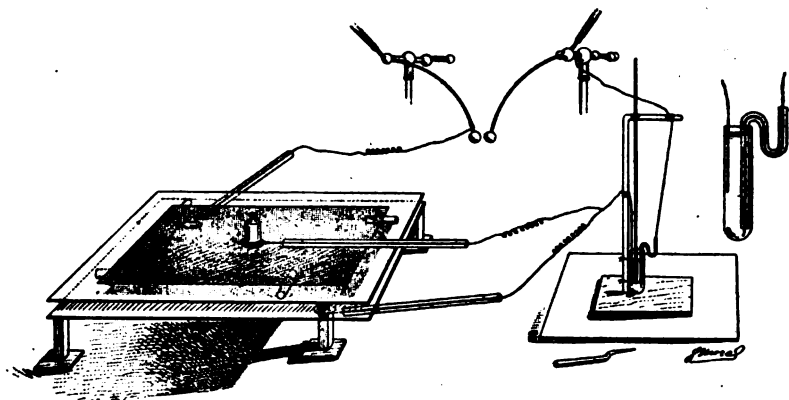
L'énergie, qui est assez faible, va être mesurée par un procédé calorimétrique (1). On se procure donc un thermomètre qui doit être divisé au moins en cinquièmes de degré. Le calorimètre est constitué par un tube à essais ($h = 7^{\text{cm}}$; $d = 1^{\text{cm}}$, 8); on le maintient verticalement en l'attachant le long d'une potence en verre ($d = 0^{\text{cm}}$, 6; $l = 25^{\text{cm}}$) plantée dans une planchette de bois (15^{cm} ; 10^{cm} ; 1^{cm} , 5).

(1) Les cabinets de physique possèdent quelquefois un thermomètre à air contenant un fil métallique. Cet appareil est à sensibilité réglable et il permet de



réaliser assez aisément ces expériences. Mais les mesures que l'on fait ainsi ne font pas connaître la valeur absolue de l'énergie mise en jeu.

La décharge traverse l'eau du tube calorimétrique. Le courant arrive au fond du tube par un fil de cuivre ($d = 0^{\text{cm}}, 03$) protégé jusqu'en bas par un tube de verre ($d = 0^{\text{cm}}, 3$) que l'on courbe en forme de S pour qu'il tienne sur le bord du calorimètre. Le



courant est repris par un autre fil de cuivre plongeant un peu dans le liquide. Ces deux fils sont mastiqués le long de la potence et l'on y mastique aussi un petit anneau destiné à soutenir le thermomètre.

Cet appareil calorimétrique devra être isolé par de la paraffine ou par une large plaque de verre gomme-laquée ($30^{\text{cm}}; 30^{\text{cm}}$).

Expériences. — Verser 10^{cm^3} ou 15^{cm^3} d'eau distillée dans le tube calorimétrique, en se servant d'un tube de verre ($l = 25^{\text{cm}}; d = 0^{\text{cm}}, 8$) qui a été étiré et courbé, de manière à constituer une pipette coudée.

Grouper les deux condensateurs *en surface* et réunir leurs armatures aux pôles de la machine électrique, en passant par le tube calorimétrique, comme l'indique la figure. Les boules de l'excitateur de la machine doivent être rapprochées, à une distance d'environ $0^{\text{cm}}, 5$ à 1^{cm} . On détermine cet intervalle en plaçant entre ces boules une plaque d'épaisseur connue.

Noter la température initiale du calorimètre, en appréciant les dixièmes des divisions du thermomètre et mettre la machine en marche.

Compter le nombre de décharges en suivant la température du calorimètre. Quand cette température se sera élevée d'environ un

degré, on arrêtera la machine et l'on déterminera la quantité de chaleur créée dans le calorimètre.

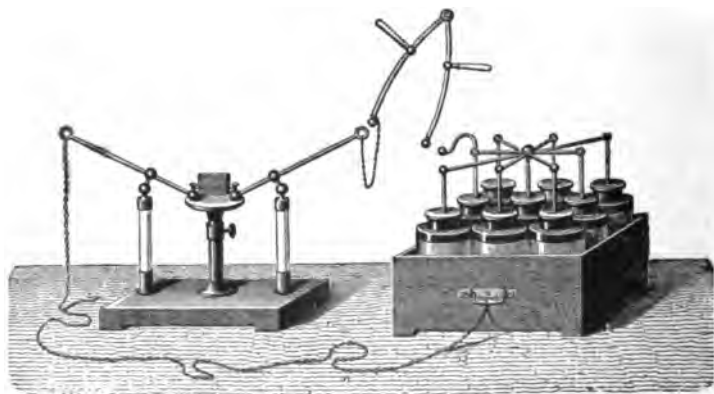
Avant d'aller plus loin, on devra s'assurer que la *résistance* du calorimètre est de beaucoup supérieure à celle de l'étincelle. Pour le vérifier, il suffira de remplacer l'eau distillée soit par de l'eau ordinaire, soit par de l'eau distillée contenant une trace de matières salines, et l'on reconnaîtra que l'augmentation de conductibilité ainsi obtenue n'influe pas sensiblement sur la quantité de chaleur recueillie.

— Changer ensuite les connexions de manière à grouper les deux condensateurs *en cascade*, mais en conservant la même distance explosive ; et répéter les mesures.

La quantité de chaleur que crée chaque décharge est-elle, dans cette dernière expérience, *le quart* de celle que l'on avait obtenue précédemment ?

L'énergie recueillie dans le calorimètre est-elle une fraction appréciable de l'énergie mécanique que le moteur fournit à la machine électrique (**VII, 42**) ?

Valeur absolue de la quantité d'électricité débitée par chaque décharge. — On déterminera cette valeur par la mesure du potentiel au moment de la décharge.



On aurait une évaluation satisfaisante de ce potentiel en se reportant aux valeurs des potentiels explosifs déjà déterminées (**VII, 21**). Mais il sera préférable de refaire la mesure dans les conditions mêmes de l'expérience, en mettant les deux armatures du condensateur en communication avec les plateaux de l'électromètre-balance.

Fusion des fils. — On peut remplacer le calorimètre par un fil de maillechort très fin ($d = 0^{\text{cm}}, 005$). A défaut de ce métal, on prendra le ruban de laiton très mince qui se trouve enroulé sur du fil de coton pour la fabrication de certains articles de passementerie.

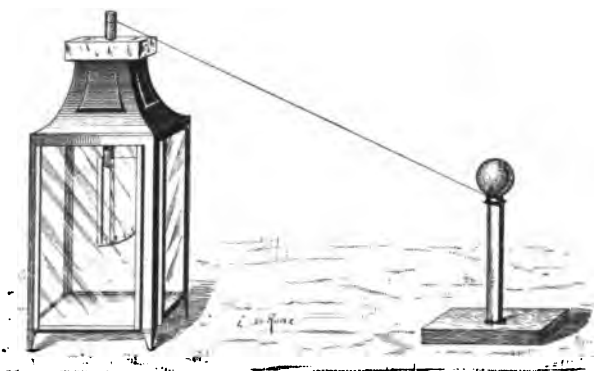
On fait varier la longueur du fil en le raccourcissant jusqu'à ce qu'il soit volatilisé par une décharge de la batterie, et la longueur de fil volatilisé mesure l'énergie disponible dans la décharge.

La figure de la page 200, empruntée à un traité classique, montre la disposition de cette expérience, réalisée avec un matériel qui se trouve fréquemment dans les cabinets de physique (100).

COURANTS DE CHARGE ET DE DÉCHARGE.

44. Égalisation lente des potentiels. — Fixer une boule métallique ($D = 3^{\text{cm}}$) sur un support constitué par un bâton de cire à cacheter ($h = 10^{\text{cm}}$) fixé lui-même sur une planchette de bois. Relier ce conducteur à la tige d'un électroscope à feuille d'or au moyen d'un fil de lin ou de coton ($l = 100^{\text{cm}}$). Les expériences se font bien avec du *fil de Bretagne fin*.

Charger l'électroscope et observer la déviation initiale. Cette



déviations diminue et atteint en quelques secondes une valeur limite. Soutenant alors le fil avec un bâton de cire à cacheter, on mettra la boule métallique en contact avec la tige de l'électroscope. La déviation de l'électroscope change-t-elle par ce contact ? L'égalité des potentiels était-elle atteinte ?

On peut aussi faire l'expérience en sens inverse, c'est-à-dire que l'on charge d'abord la boule isolée et que l'on suit l'augmentation progressive de la déviation de l'électroscope, jusqu'à l'égalisation des potentiels.

— Mettre la même boule isolée en communication, d'une part, avec la tige de l'électroscope au moyen du *fil de Bretagne* et, d'autre part, avec la cage de l'appareil au moyen d'un fil métallique.

Répétant alors la première expérience, on constatera que la déviation de l'électroscope diminue jusqu'à ce qu'il soit complètement déchargé.

45. Régime permanent. Distribution des potentiels le long du fil. — *Montage.* — Préparer un condensateur à lame d'air constitué par deux feuilles de zinc (50^{cm} ; 50^{cm} ; $0^{\text{cm}}, 2$) séparées par quatre cales de paraffine ($h = 1^{\text{cm}}$). Relier par des fils métalliques l'armature inférieure du condensateur avec la cage d'un électroscope à feuille d'or et l'armature supérieure avec la tige de cet appareil.

Établir encore une communication entre les deux armatures



du condensateur par l'intermédiaire d'un *fil de Bretagne* fin ($l = 100^{\text{cm}}$) porté par des bâtons de cire à cacheter. Ce fil sera doublé sur une moitié de sa longueur.

Si le temps était très sec, on opérerait sur des longueurs de fil moins considérables.

Disposer, enfin, un deuxième électroscope à feuille d'or sur une plaque de paraffine. Attacher des fils métalliques ($l = 60^{\text{cm}}$) à la cage et à la tige de ce dernier appareil et fixer les extrémités de ces deux fils à l'extrémité de bâtons de cire à cacheter qui serviront à les manœuvrer.

Expériences. — Charger le condensateur, noter la déviation du premier électroscope et constater qu'elle diminue lentement.

Exercer un aide à maintenir cette déviation presque exactement constante en renouvelant la charge du condensateur au moyen d'un électrophore et d'un corps d'épreuve (VII, 10).

Mettre les deux armatures du second électroscope à feuille d'or en communication avec deux points du *fil de Bretagne* où passe le courant électrique. On attendra quelques instants pour que le trouble apporté au régime permanent ait disparu, et l'on mesurera la déviation de l'appareil.

Loi des longueurs. — La différence de potentiel ainsi mesurée reste la même si l'on déplace les deux contacts le long du fil, pourvu que leur écartement reste constant.

Loi des sections. — En déplaçant les contacts le long du fil doublé, on ne retrouve la même différence de potentiel que pour un écartement deux fois plus grand de ces deux contacts.

46. Mesure des intensités. Méthode des durées de décharge. — Relier les deux armatures d'un électroscope à feuille d'or par un *fil de Bretagne* fin ($l = 100^{\text{cm}}$) que l'on soutiendra avec un bâton de cire à cacheter.

Charger l'électroscope, et prendre comme déviation initiale la déviation que l'on mesure quelques secondes après l'instant de la charge.

Étudier ensuite la diminution progressive de la différence de potentiel en notant, par exemple, les déviations tous les quarts de minute.

Construire la courbe représentant la chute de la différence de potentiel en fonction du temps.

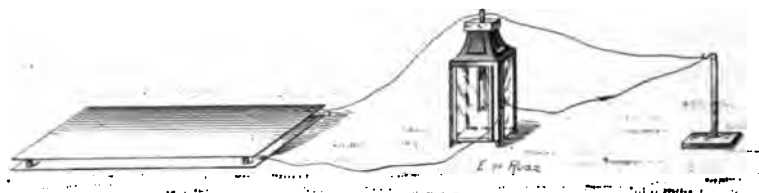
On tracera les tangentes en plusieurs points de cette courbe afin de déterminer la vitesse d'écoulement de la charge aux époques correspondantes.

La vitesse de chute et, par conséquent, *l'intensité du courant* sont-elles, à chaque instant, proportionnelles à la différence de potentiel qui existe entre les extrémités du fil?

— Avec les mêmes dispositifs, mais en employant un fil plus court, ou bien un fil doublé ou triplé, on vérifiera en outre que, pour une même différence de potentiel, la vitesse d'écoulement de la charge, c'est-à-dire l'intensité du courant, varie en raison inverse de la longueur du fil, et proportionnellement à sa section. On constatera, notamment, que le régime de décharge à travers le fil multiple est le même lorsque les fils sont séparés les uns des

autres, et lorsque ces fils sont réunis en un faisceau compact.

— Relier métalliquement les armatures de l'électroscope avec celles d'un condensateur cylindrique ou plan dont on aura comparé la capacité à celle de l'électroscope (**VII, 36**).



La vitesse de décroissance du potentiel est beaucoup diminuée. A-t-elle varié en raison inverse de la capacité totale?

— Dans cette dernière expérience, la capacité du condensateur qui se décharge est connue en unités C.G.S. électrostatiques. Or notre expérience fait connaître la fraction de la charge qui s'écoule dans les premières secondes de la décharge.

Quelle est, d'après cela, la résistance du *fil de Bretagne*, évaluée en unités C.G.S. électrostatiques? Combien la *résistivité* de ce conducteur est-elle de fois plus grande que la résistivité du cuivre?

— Comparer les résistances de différents corps isolants tels que du fil de coton, du fil de soie, du verre propre, du verre gomme-laqué ou paraffiné, de la cire molle, etc., en mesurant le temps que l'électroscope met à se décharger de moitié à travers ces corps (100, 175).

47. Électroscope à décharge. — *Montage.* — Plier un fil de cuivre ($l = 25^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{mm}}$,₁) comme l'indique la figure. Mettre ce conducteur dans la cage de l'électroscope, et le faire tenir contre le fond avec un peu de cire molle en le plaçant de manière que la feuille d'or vienne juste le toucher quand elle se sera écartée d'environ 30° de la verticale.



— On pourra aussi construire l'électroscope avec un flacon tubulé en bas et passer une tige de métal à travers un bouchon fermant la tubulure (69, 100, 126).

Dans toutes les expériences on devra donner sans cesse de petites secousses à l'électroscope à décharges pour que la feuille d'or ne se colle pas contre le conducteur intérieur.

Courant de charge de l'électroscope. — Approcher très lentement un corps électrisé de la tige de l'électroscope et compter le nombre de fois que la feuille d'or s'est chargée par influence pour aller se décharger contre le conducteur intérieur.

Observe-t-on le même nombre de décharges intérieures quand, ensuite, on éloigne progressivement le corps électrisé?

Vérification des lois du courant. — Construire un électroscope peu sensible avec une feuille de clinquant battu ou une bande de papier d'étain (5^{cm}; 0^{cm}, 25; 0^{cm}, 001) au lieu d'une feuille d'or. Mettre les deux armatures de cet appareil en communication métallique avec celles d'un condensateur à lame d'air (VII, 36).

Relier, d'autre part, par un fil métallique ($l = 100^{\text{cm}}$) la cage de l'électroscope peu sensible avec celle de l'électroscope à décharges.



Attacher enfin aux tiges des deux appareils les deux bouts d'un conducteur médiocre (fil de Bretagne fin, $l = 100^{\text{cm}}$).

Charger le condensateur, noter la déviation de l'électroscope avec lequel il est en communication métallique et maintenir cette déviation constante en alimentant la dépense d'électricité au moyen d'un électrophore et d'un corps d'épreuve.

Une fois le régime établi, on compte le nombre de décharges qui se produisent, par exemple, pendant trois minutes dans l'électroscope à décharges.

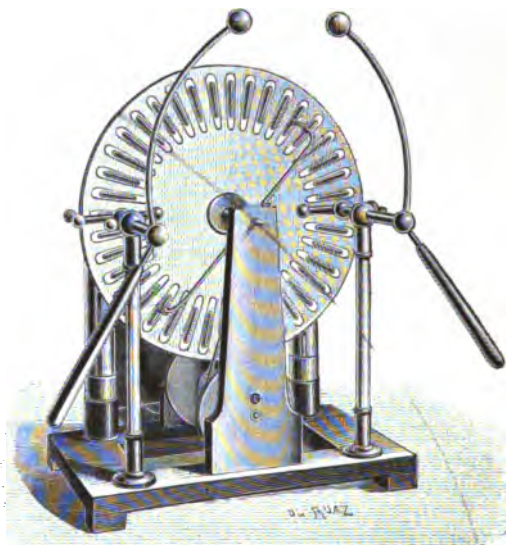
En faisant varier le potentiel de charge, on constatera que le nombre des décharges augmente *presque* proportionnellement à ce potentiel. L'écart tient à ce que les décharges de l'électroscope débitent chacune d'autant moins d'électricité que ces décharges se succèdent plus rapidement.

— Si l'on change la longueur du fil, si on la double par exemple, on devra doubler aussi le potentiel pour que le débit d'électricité reste le même.

— En remplaçant le fil unique employé par deux fils groupés en

parallèle, mais de longueur double, on constatera que, pour la même différence de potentiel, les décharges de l'électroscope se succèdent avec la même vitesse.

48. Faible durée de la décharge disruptive. — Mettre une machine électrostatique en marche et en tirer des étincelles. Au



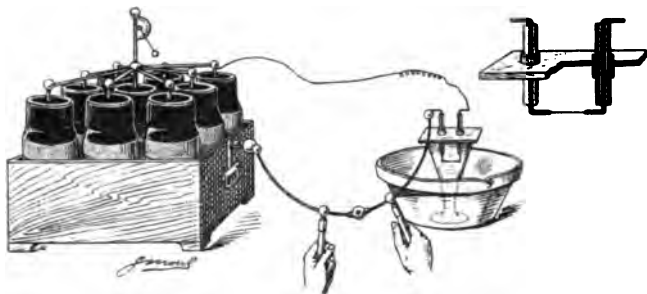
moment où l'étincelle éclate les plateaux qui tournent sont subitement éclairés.

En examinant avec soin les secteurs de papier d'étain, on reconnaît qu'ils paraissent absolument immobiles pendant toute la durée de cet éclairement. Estimer quel est le déplacement qui a pu, cependant, se produire pendant la durée de l'étincelle sans qu'on ait pu l'apercevoir. Estimer aussi la vitesse de rotation de la machine.

Quelle est, d'après cette expérience, la durée maxima que l'on puisse attribuer à l'éclairement produit par l'étincelle?

Torpille électrique. — Faire passer deux fils de cuivre ($l = 25\text{ cm}$; $d = 0\text{ cm}, 2$) dans des tubes de verre ($d = 0\text{ cm}, 7$; $l = 15\text{ cm}$) et plier les fils aux deux bouts de chaque tube. Au moyen de deux bouchons, fixer les deux tubes de verre dans une planchette (15 cm ; 10 cm ; 1 cm). Attacher un fil de fer (ou de platine) assez fin ($l = 4\text{ cm}$; $d = 0\text{ cm}, 005$) entre les deux fils de cuivre.

Placer alors l'appareil sur un verre à expériences plein d'eau, le fil fin au milieu de la masse d'eau. Mettre le verre dans une cuve en grès et relier métalliquement l'un des fils à l'armature extérieure d'une forte batterie de condensateurs (VII, 203),



neuf grandes jarres par exemple. Charger enfin cette batterie avec une machine électrique.

Quand la batterie est chargée aussi fortement que possible, on envoie la décharge dans le fil fin au moyen d'un excitateur. L'échauffement du fil et sa volatilisation se produisant en un temps très court, l'eau est violemment comprimée autour de lui, une *onde* se propage dans la masse avec une vitesse voisine de la vitesse du son dans l'eau; et quand cette onde arrive sur les parois, les efforts produits sur le verre sont si violents que le vase est brisé.

Cette expérience devra être faite avec beaucoup de précautions pour éviter de recevoir la décharge, qui pourrait être dangereuse (66, 116).

49. Intensité électromagnétique du courant de décharge. — Se procurer un galvanomètre permettant de déceler au moins le millionième d'ampère.

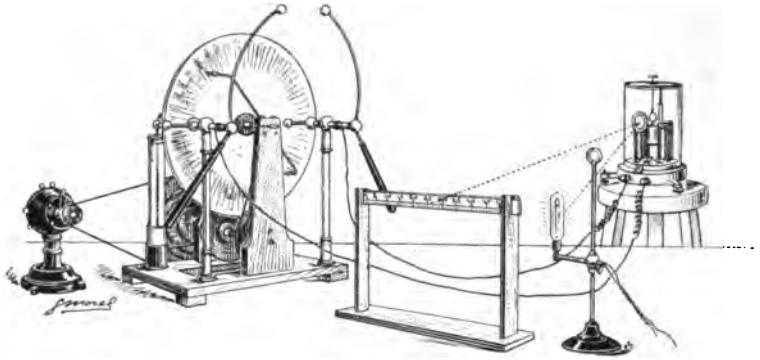
Les galvanomètres à cadre mobile et les galvanomètres astatiques les plus simples ont, en général, une sensibilité suffisante, pourvu qu'on les ait construits avec des *enroulements de fil fin*.

Relier par des fils de cuivre les bornes du galvanomètre avec les deux pôles d'une machine électrique, noter la position d'équilibre du galvanomètre, puis mettre la machine en marche.

On constate que le galvanomètre dévie tant que la machine fonctionne, que cette déviation change de sens quand on intervertit les communications du galvanomètre et de la machine, qu'elle est supprimée si l'on réunit les deux bornes du galvanomètre par un

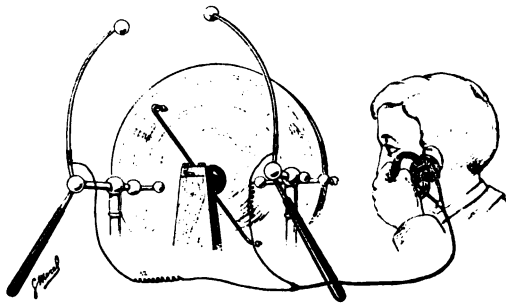
fil de cuivre, et que la déviation est d'autant plus grande que la vitesse de la machine est plus grande.

Pour déterminer en unités électromagnétiques les intensités



des courants que l'on vient d'observer, on étalonne le galvanomètre. Il suffit pour cela de le placer dans le circuit d'une pile Daniell ou d'un accumulateur (**VII, 102**) avec une résistance de 10000 ohms, devant laquelle la résistance du galvanomètre est, le plus souvent, négligeable. L'intensité du courant qui passe alors dans le galvanomètre est connue, puisque l'on connaît la force électromotrice et la résistance ($I = \frac{E}{R}$). Si donc on mesure la déviation que l'on obtient maintenant, une simple proportion fera connaître l'intensité du courant que fournissait tout à l'heure la machine électrique.

Emploi du téléphone. — Attacher les deux fils d'un récepteur téléphonique aux deux pôles d'une machine électrostatique.



Quand on met la machine en marche, on entend dans le téléphone un bruissement indiquant la production d'une série de

courants de courte durée. En laissant la machine se ralentir, on reconnaîtra que ces courants correspondent aux passages des secteurs. Ce sont donc les décharges des secteurs qui alimentent le courant fourni par la machine électrique.

50. Électrolyse. — Se procurer du papier réactif à l'iodure de potassium amidonné (¹). Placer un morceau de ce papier réactif humide sur une plaque de verre. Attacher des fils de cuivre ($d \doteq 0^{\text{cm}}, 1$) aux deux pôles d'une machine électrique et appliquer les bouts libres de ces fils sur le papier réactif.

Mettre la machine en marche pendant quelques instants, puis examiner le papier réactif. On y trouve un point bleu à l'endroit où il était touché par l'un des deux fils.

Reconnaître alors que le pôle correspondant de la machine est bien le pôle positif. Il ne sera pas nécessaire pour cela de remettre la machine en marche, il suffira de constater que ce pôle porte encore une charge positive : on fera l'expérience avec un corps d'épreuve et un électroscope (**VII, 24**).

EMPLOI DE LA BOBINE D'INDUCTION POUR LA CHARGE DES CONDENSATEURS.

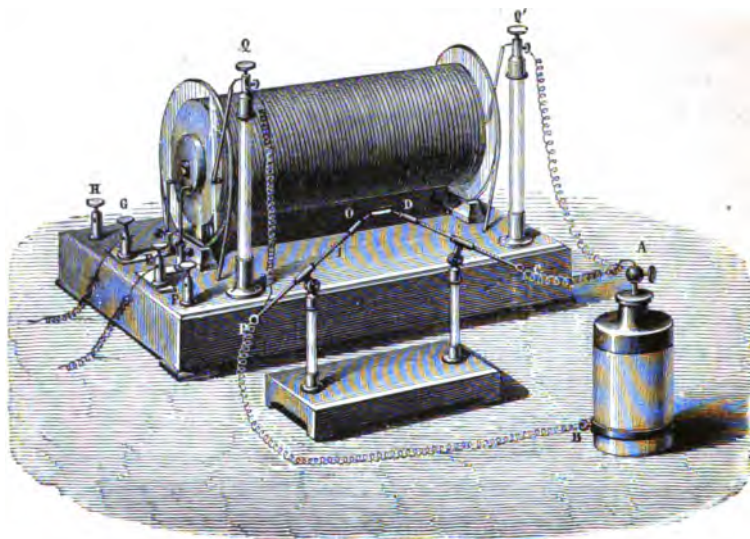
51. Les figures de la page suivante, empruntées à un *Traité classique*, indiquent les deux modes de montage que l'on peut employer.

Le premier cas est celui des faibles capacités. Au moment de la rupture du courant primaire, le condensateur AB se charge, et il se décharge aussitôt dans l'éclateur OD.

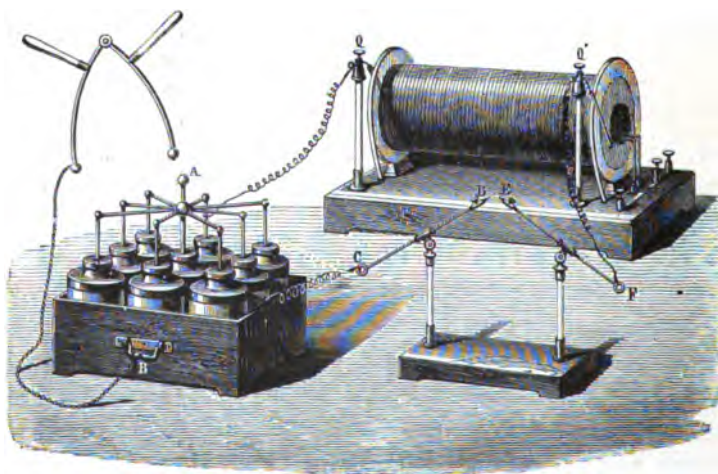
Le second cas est celui d'une capacité trop grande pour être chargée par un seul courant induit. Dans ce cas, on monte le condensateur *en série* avec un éclateur DE. A chaque rupture du primaire, une étincelle éclate en DE; au bout d'un certain nombre

(¹) Délayer 0,3 d'amidon dans 25^{cm}³ d'eau froide, porter à l'ébullition en agitant. Ajouter 0,1 d'iodure de potassium et 0,1 de carbonate de sodium, puis compléter la solution à 100^{cm}³. Du papier (non collé) humecté avec cette solution est plus sensible que du papier que l'on a mouillé et laissé sécher (155).

d'étincelles, la batterie est suffisamment chargée pour qu'on en



puisse tirer une forte étincelle en A.



CONVECTION ÉLECTRIQUE DANS LES GAZ.

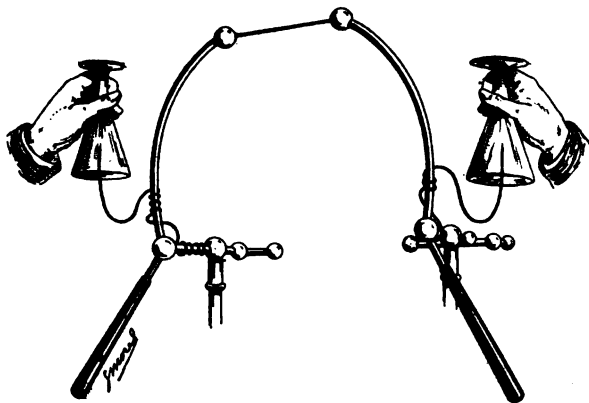
52. Décharges par les pointes. — Couper deux fils métalliques ($l = 30^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 2$), leur faire à chacun une pointe

aiguë avec une lime et les attacher aux deux pôles d'une machine électrostatique.

En mettant la machine en marche, on ne pourra en tirer que des étincelles très courtes, car la majeure partie des charges électriques s'échappe par les pointes. Dans l'obscurité, on verrait en même temps des aigrettes lumineuses partir des pointes et s'épanouir dans l'air.

Pour que l'action des pointes disparaisse, il suffit qu'elles soient placées dans un champ nul.

Si l'on recouvre, en effet, ces pointes avec des tubes à essais, la



machine est de nouveau capable de fournir de longues étincelles. On obtient le même résultat en coiffant les pointes avec des verres retournés qui ne les touchent pas.

Il sera aisé de reconnaître ensuite avec un électroscope à feuille d'or que les écrans de verre se sont chargés et qu'ils emportent, chacun, de l'électricité de même signe que l'électricité débitée par la pointe correspondante.

— Un conducteur isolé placé dans le voisinage de la machine se charge d'électricité positive ou négative, selon le signe de la pointe la plus voisine.

— L'électroscope dont on se sert dans ces essais doit être placé à 1^m ou 2^m au moins de la machine. Si l'on oubliait cette précaution, l'électroscope lui-même recueillerait les charges positives ou négatives que l'air transporte irrégulièrement au voisinage de la machine et toute mesure serait rendue impossible.

Électroscope à feuille d'or à pointe. — Lier une aiguille fine (n° 10), la pointe en l'air, sur la tige d'un électroscope à feuille

d'or. Si un corps chargé est approché de la pointe, l'électroscope prend une charge de même signe que la charge de ce corps.

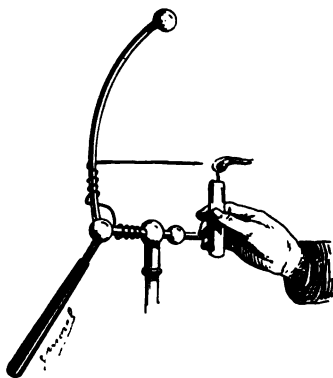
En éloignant ensuite le corps influençant, l'électroscope reste partiellement chargé.

Le potentiel auquel l'électroscope peut rester chargé, malgré la



présence de la pointe, est d'autant plus faible que cette pointe est plus aiguë (64).

53. Vent électrique. — En approchant la main de l'une des



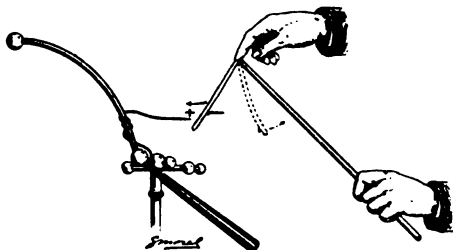
pointes fixées sur la machine (VII, 52), on sent que cette pointe produit un vif courant d'air (175).

Ce courant d'air peut souffler la flamme d'une bougie. L'expérience réussit beaucoup mieux avec le pôle positif de la machine

qu'avec le pôle négatif, en raison des charges libres qui existent dans la flamme (VII, 55).

— Si l'on veut apprécier l'importance de ce vent électrique d'après la pression qu'il produit sur un obstacle, on ne doit pas oublier que cet obstacle peut porter des charges électriques et être alors soumis à une pression électrique de sens contraire à la pression qu'on veut mesurer. Cet effet est mis nettement en évidence par l'expérience suivante,

On suspend une bande de papier d'étain (15^{cm} ; 1^{cm} ; $0^{\text{cm}},001$)



à une potence de verre. Cette bande de métal est *repoussée* par le vent électrique tant qu'on la maintient isolée : elle est, au contraire, *attirée* si on la met en communication avec le sol.

54. Tourniquet électrique. — Couper un fil de cuivre ($l = 25^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}},02$), lui faire à la lime une pointe aiguë à chaque extrémité et le courber comme l'indique la figure.

On fait tenir ce fil en équilibre en le soutenant par le milieu; les pointes se trouvent alors horizontales et perpendiculaires au rayon.



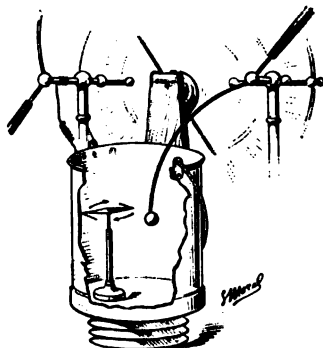
Le support de l'appareil comporte une partie conductrice telle qu'une pièce de monnaie posée horizontalement sur un tube métallique vertical et l'on isole ce support en le fixant par exemple sur un bouchon qu'on colle sur le fond d'une assiette de faïence.

On met l'appareil en communication avec l'un des pôles de la machine électrique; le tourniquet prend alors un rapide mouvement de rotation.

— Si l'on possède une aiguille aimantée montée sur pivot, il suffit de fixer des aiguilles à coudre avec un peu de cire aux deux bouts de l'aiguille aimantée pour réaliser un bon tourniquet électrique.

Cet appareil ne *tourne* que si l'on emploie des potentiels éle-

vés. Pour des potentiels plus faibles, il subit seulement une déviation. Cette déviation permet de calculer la valeur absolue des forces exercées sur les pointes, puisque l'on connaît la valeur du



champ terrestre et que le moment magnétique de l'aiguille peut être évalué d'après la mesure de sa période d'oscillation (**VII, 128**).

— La réaction sur les pointes cesse, comme la déperdition, quand ces pointes sont dans un champ nul.

Plaçons, en effet, un seau métallique ($D = 26^{\text{cm}}$) sur un support isolant, tel qu'une pile d'assiettes. Posons le tourniquet au fond du seau et faisons communiquer l'appareil avec l'un des pôles d'une machine électrique. Aucune rotation ne se produit.

La rotation reprend, au contraire, si l'on place à l'intérieur du seau et près du tourniquet un conducteur en communication avec l'autre pôle de la machine (100).

55. Conductibilité des flammes. — *Montage.* — Placer deux fils de fer ($d = 0^{\text{cm}}, 1$), les bouts en regard à moins de 1^{cm} de distance, de façon qu'on puisse les chauffer dans la flamme d'un bec Bunsen; ils seront soutenus par des baguettes de verre ($d = 0^{\text{cm}}, 7$; $l = 20^{\text{cm}}$) mastiquées dans une planchette (20^{cm} ; 10^{cm} ; $1^{\text{cm}}, 5$).

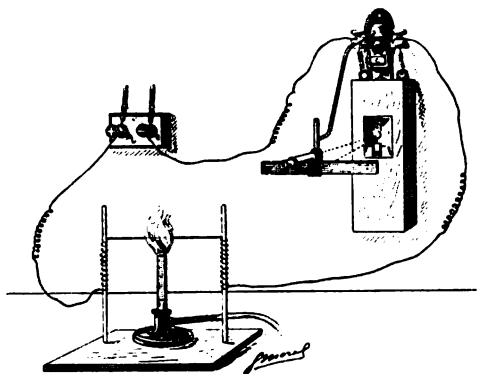
Au moyen de fil de cuivre (fil de sonnerie), relier ces deux fils de fer à une batterie de quelques éléments de piles ou d'accumulateurs et à un galvanomètre assez sensible pour déceler le dixième de microampère (un galvanomètre à cadre mobile pour mesures industrielles est suffisant).

On fera bien d'intercaler dans le circuit une résistance de quelques centaines d'ohms pour éviter qu'un court-circuit ne brûle le galvanomètre.

Expériences. — Placer les deux pointes de fer dans la flamme d'un bec Bunsen et noter la déviation du galvanomètre.

Faire croître ensuite la force électromotrice employée et étudier les variations correspondantes du courant. Le courant est-il proportionnel à la force électromotrice?

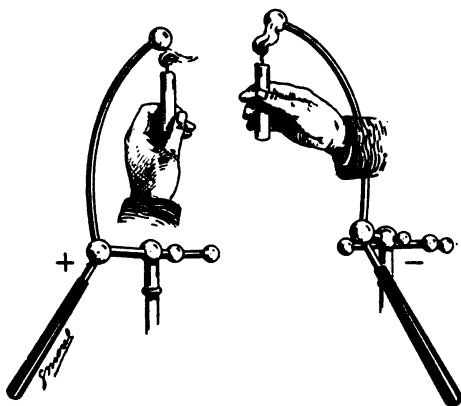
Modifier la position des pointes de fer dans la flamme et con-



stater les variations que subit le courant suivant que tel ou tel pôle est plus ou moins chauffé (15 bis, 82 bis).

Flamme de sodium. — Mettre un fil de verre à la base de la flamme du bec Bunsen de manière à la colorer par de la vapeur de sodium et lire la nouvelle déviation. La conductibilité de la flamme est fortement augmentée (15 bis, 82 bis).

Flammes éclairantes. — Remplacer la flamme du bec Bunsen



par la flamme d'une bougie. La conductibilité est maintenant considérable.

Charges libres dans la flamme. — Dans l'expérience précédente, lorsqu'on place les fils de fer dans la flamme d'une bougie, le *fil négatif* se recouvre d'une chevelure de particules de charbon qui croît à vue d'œil, comme si les particules de charbon en suspension dans la flamme étaient chargées positivement.

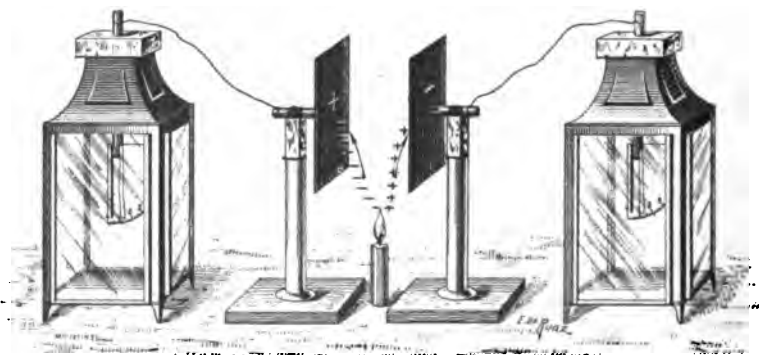
— De même, si l'on met en marche une machine électrique et si l'on approche la flamme de la bougie du pôle négatif, la partie brillante de la flamme est nettement attirée et il se fait sur la machine un abondant dépôt de noir de fumée.

Au contraire, si l'on approche la flamme du pôle positif, cette flamme sera comme repoussée et l'on ne pourra pas obtenir de dépôt de noir de fumée sur le métal (figure page 215).

56. Action des gaz ionisés par la flamme. — Constituer un condensateur à armatures verticales, distantes de 10^{cm} , au moyen de deux plateaux métalliques semblables à ceux de l'électroscope condensateur (VII, 14). Maintenir ces plateaux avec de la cire sur des supports isolants formés, par exemple, d'un morceau de paraffine mastiqué sur une éprouvette à pied, mastiquée elle-même sur une planchette de bois.

Relier les armatures du condensateur avec les tiges de deux électroscopes à feuille d'or. Charger l'un des électroscopes, en maintenant l'autre au sol, et s'assurer que l'électroscope chargé conserve bien sa charge.

Si l'on met alors une bougie en dessous du champ électrique du



condensateur; de manière que les gaz chauds passent dans ce champ, on constate que le premier électroscope se décharge, tandis que le second se charge.

Les charges ne cessent de varier que lorsque le champ entre les deux plateaux a disparu, c'est-à-dire quand ces deux plateaux sont au même potentiel. On reconnaîtra qu'il en est bien ainsi en réunissant alors les deux parties de l'appareil par un fil de cuivre (149).

Si le second plateau communiquait avec la cage du premier électroscope, la décharge serait complète.

— Projeter, sur un écran, l'ombre des gaz chauds en se servant d'une source quasi-ponctuelle. Quand il n'y a pas de champ électrique, la colonne des gaz chauds monte verticalement entre les deux plateaux; mais, dès que le champ est établi, on voit deux courants gazeux se détacher et s'infléchir vers les plateaux pour aller leur porter les charges positives et négatives (15 bis, 82 bis).

— Si l'un des plateaux est en laiton et l'autre en zinc, la suppression du champ électrique entre les plateaux crée entre les armatures de l'électroscope une différence de potentiel d'environ un volt représentant la différence de potentiel au contact du zinc et du laiton.

Cette différence de potentiel pourra être mise en évidence si l'on se sert d'un électroscope condensateur (VII, 14) ou d'un électromètre à quadrants (149).

— Dans toutes ces expériences, la position de la bougie est

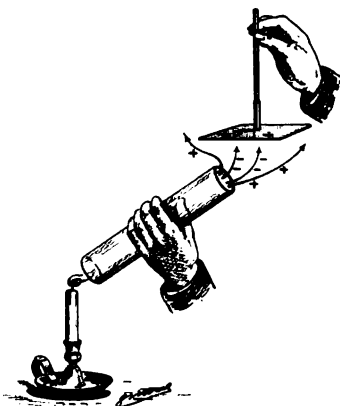


indifférente, pourvu que les gaz chauds viennent couper des lignes de force du champ électrique. Aussi, si l'on place une bougie allumée sur le plateau d'un électroscope, on pourra bien, pour un instant, charger cet électroscope; mais l'appareil ne saurait conserver aucune charge permanente, puisque les gaz *ionisés* qui s'é-

lèvent au-dessus de la flamme coupent nécessairement des lignes de force du champ (100).

— L'effet produit par les gaz de la flamme sur un conducteur chargé disparaît, du reste, complètement si la flamme est surmontée d'une cheminée de métal ou de verre qui entraîne les gaz *ionisés* en dehors du champ électrique et empêche leur diffusion vers le conducteur dont il s'agit.

— On pourra, cependant, reconnaître que ces gaz *ionisés*, déviés de leur route verticale au moyen d'une cheminée de verre ou de



métal, ont conservé leur pouvoir de décharger les corps électrisés.

57. Ionisation par l'oxydation du phosphore, par les rayons X et par le radium. — Le phosphore qui s'oxyde donne à l'air des propriétés semblables à celles des gaz de la flamme. Un électroscope à feuille d'or ne peut pas rester chargé si l'on a placé un fragment de phosphore sur le plateau de l'appareil (15 *bis*, 82 *bis*).

— Un fragment de phosphore, placé sur un support quelconque entre les armatures d'un condensateur chargé, décharge ce condensateur comme le font les gaz qui proviennent de la combustion d'une bougie (VII, 56).

Ionisation par les rayons X. — L'air qui vient d'être traversé par des *rayons X* (VII, 60) est ionisé. Il a les mêmes propriétés que l'air qui a passé sur du phosphore blanc.

Ionisation par le radium. — On obtient encore des effets semblables en employant à la place du phosphore une substance *radioactive* telle qu'un sel de radium. L'ionisation est un effet indirect de la radioactivité. Le corps radioactif émet spontanément

des rayons analogues aux *rayons cathodiques* et aux *rayons X*, et ce sont ces rayons qui ionisent le gaz.

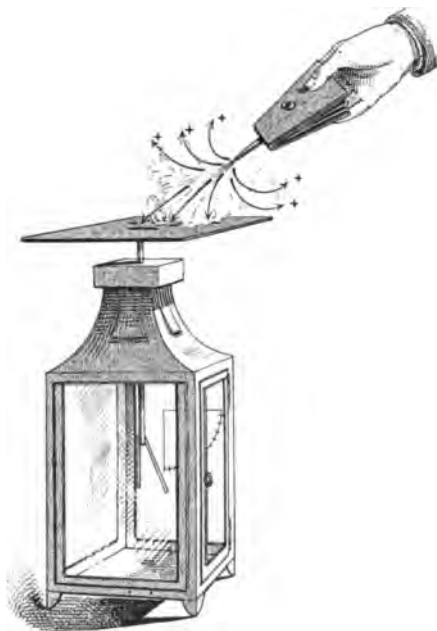
58. Condensation des vapeurs par les gaz ionisés.

— Mettre de l'eau dans un ballon ($V = 1^l$) et fermer ce ballon par un bouchon traversé par un tube de verre ($d = 0^{\text{cm}}, 8$). Ce tube est taillé en biseau à sa partie inférieure; il part du milieu du col, s'incline presque horizontalement à l'extérieur du ballon ($l = 40^{\text{cm}}$) et se termine en pointe ($d = 0^{\text{cm}}, 2$).

Quand on fait bouillir doucement l'eau du ballon, un panache de vapeur à peine visible s'échappe de la pointe du tube de verre. Si l'on *ionise* l'air que cette vapeur entraîne, on provoque la condensation de la vapeur qui prend l'aspect d'un nuage.

L'expérience est très frappante quand on observe l'*ombre* du jet de vapeur en se servant d'une source ponctuelle éloignée. Le jet de vapeur, qui était presque transparent, devient opaque au moment où la condensation se produit (15 bis, 82 bis).

59. Imitation des décharges produites par l'air ionisé.



— Charger un électroscope à feuille d'or muni de son plateau. Préparer, d'autre part, un mélange de fleur de soufre et de minium, et projeter de loin ce mélange au-dessus de l'électroscope au moyen

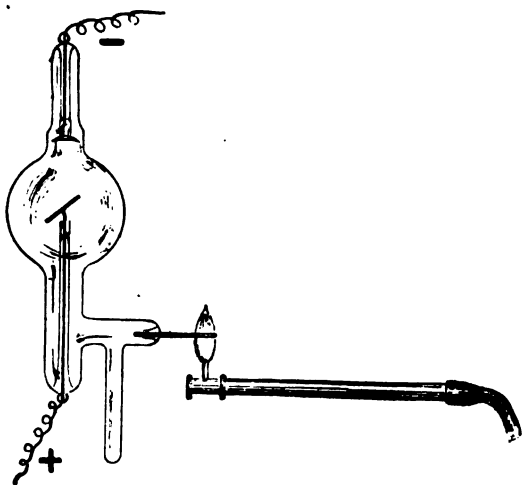
d'un petit soufflet. La déviation de l'appareil diminue progressivement et finit par disparaître. Cependant, si l'on continue à projeter le mélange électrisé, l'électroscope ne se charge pas.

La charge de l'électroscope n'a pas été détruite dans cette expérience, à l'inverse de ce qui se serait produit avec un gaz *ionisé*. La charge a seulement été ramenée de la feuille d'or sur le plateau par la poudre chargée de signe contraire qui s'y est déposée. Si, en effet, on chasse cette poudre en soufflant sur le plateau, la déviation primitive est rétablie.

DÉCHARGES DANS LES GAZ RARÉFIÉS.

60. Les tubes à vide les plus fréquemment utilisés sont des *tubes focus* qui ont été complètement vidés d'air et contiennent de l'hydrogène.

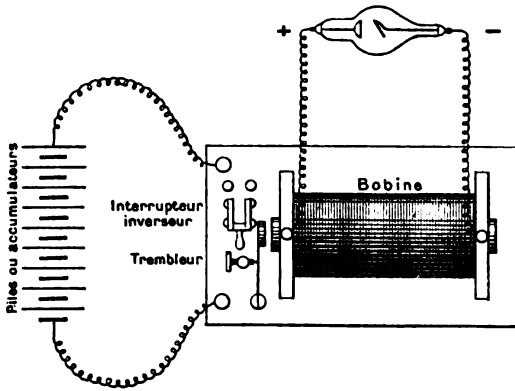
On peut faire varier à volonté la pression dans ce tube au moyen



d'un régulateur à osmose formé simplement d'un petit tube de platine soudé dans le verre. Si l'on chauffe ce tube au rouge, comme l'indique la figure, il rentre dans le tube de l'hydrogène provenant de la flamme.

Pour extraire l'hydrogène, on met autour du tube de platine un petit manchon de même métal un peu plus large et ouvert aux deux bouts et l'on chauffe ce manchon au rouge vif. Le tube de platine est ainsi porté à une haute température, mais à l'abri de la flamme, et l'hydrogène intérieur sort peu à peu (149).

On actionne généralement ces tubes au moyen d'une bobine d'induction pouvant donner une vingtaine de centimètres de longueur

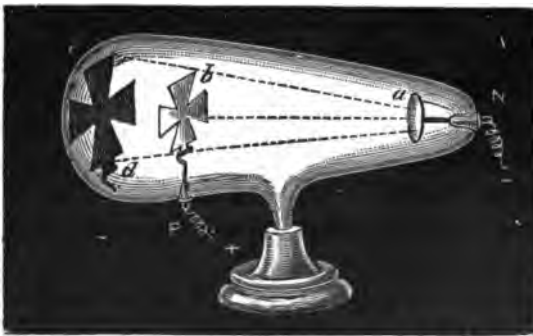


d'étincelle. La disposition des appareils est représentée par la figure.

Lumière positive. — Lorsque la pression est voisine de 1^{cm} de mercure et qu'elle devient ensuite plus petite, la décharge passe pour une différence de potentiel de plus en plus faible. Elle fait apparaître principalement dans le tube des lueurs qui semblent partir de l'électrode positive et qui s'arrêtent avant l'électrode négative (tubes de Geissler).

On constatera que cette lueur est sensible à l'action de l'aimant *comme le serait un conducteur souple*.

Rayons cathodiques. — On fera ensuite diminuer la pression



et l'on étudiera la manière dont se développent les lueurs qui entourent l'électrode négative, puis la formation du faisceau cathodique, son resserrement progressif à mesure que la pression diminue et la fluorescence qu'il produit sur le verre.

On observera que la différence de potentiel nécessaire pour faire passer la **décharge** croît maintenant de plus en plus à mesure que la raréfaction **augmente**.

On constatera que les **rayons cathodiques** se comportent comme des projectiles chargés **négativement**. Ils ne se dirigent pas vers l'autre électrode et marchent en **ligne droite** à partir de la cathode. Si l'on interpose une lame métallique **sur leur trajet**, ils sont arrêtés et l'on voit une ombre de l'objet opaque se projeter sur le verre fluorescent.

Ils sont sensibles à l'action de l'aimant comme s'ils étaient des éléments de courant **entièrement libres** et non plus **comme** des conducteurs souples : ils ne reprennent plus leur route primitive à la sortie du champ magnétique.

Rayons X. — Quand les rayons cathodiques frappent un obstacle, ils donnent naissance à des rayons **X** qui sortent du tube où ils se sont formés et se propagent en ligne droite à partir du point où ils ont été produits.

On favorise leur formation dans les tubes *focus* en prenant une



cathode concave et en recevant le faisceau cathodique sur une lame métallique (anticathode).

Cette anticathode s'échauffe fortement sous l'action des rayons cathodiques. Il faut éviter de soumettre le tube à un régime intensif prolongé, car on pourrait fondre l'anticathode et mettre ainsi l'appareil hors de service.

Les rayons **X** n'agissent pas directement sur la rétine, mais ils impressionnent les plaques photographiques et ils illuminent les corps phosphorescents. On les observe le plus souvent avec un écran de carton enduit d'une peinture contenant du *platinocyanure de baryum*.

Ils se propagent en ligne droite à travers les corps sans subir aucune réfraction; ils ne donnent donc sur les écrans que des *ombres* des objets et non des images. L'ombre d'un objet est sur la droite qui joint cet objet à l'anticathode. Les silhouettes obtenues sont donc d'autant plus nettes que la source de rayons **X** est plus éloignée et que l'objet est plus rapproché de l'écran.

Le pouvoir absorbant des différents corps pour les rayons X est très différent de leur pouvoir absorbant pour la lumière ordinaire.

Les métaux lourds restent presque opaques, l'aluminium l'est beaucoup moins, mais le bois, le *papier noir*, les tissus des animaux et des végétaux sont très transparents.

Les rayons X les plus *pénétrants* sont ceux qui ont été produits par des tubes où le vide est très avancé (*tubes durs*).

— La technique de la *radiographie* consiste simplement à envelopper la plaque photographique de papier noir (papier aiguille) et à l'exposer à l'action des rayons X derrière l'objet étudié. Le développement se fait à la manière ordinaire.

On a généralement une tendance à faire des poses trop longues. Les temps de pose doivent se compter en secondes et non en minutes.

DIFFÉRENCES DE POTENTIEL DANS LES PILES.

61. Emploi de l'électroscope ou de l'électromètre. —

L'électroscope à feuille d'or ne donne une déviation nette que si l'on établit une différence de potentiel d'une centaine de volts entre la tige et la cage. Mais on peut augmenter notablement la sensibilité de ses indications si l'on ne part pas d'une différence de potentiel nulle.

Plaçant donc l'électroscope sur une plaque de paraffine, on met la tige en communication avec le pôle positif d'une batterie de piles et l'on donne à la cage une légère charge positive, de manière que la feuille d'or diverge d'environ 30°.

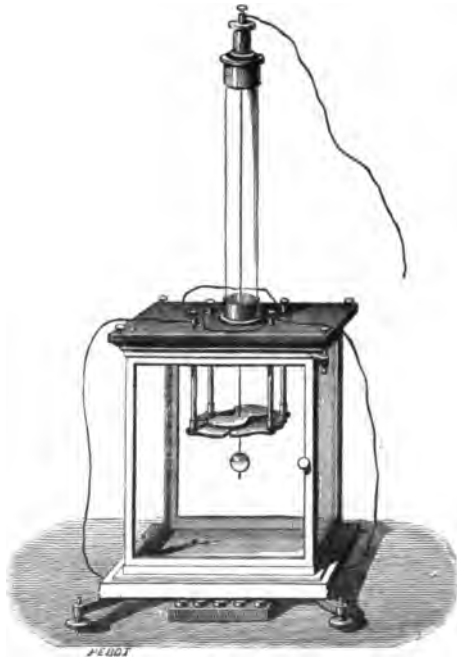
Si l'on met alors la tige en communication avec le pôle négatif de la batterie, la déviation augmentera d'une manière sensible, même si la différence de potentiel n'est que d'une trentaine de volts.

— On peut mettre en évidence la différence de potentiel aux bornes d'un seul élément de pile avec l'électroscope condensateur (VII, 14). On met simultanément les deux pôles de la pile en communication avec les deux plateaux, puis on rompt les com-



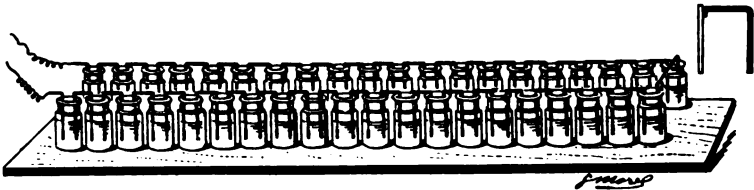
munications. En soulevant alors le plateau supérieur, on voit la feuille d'or diverger.

Emploi de l'électromètre à quadrants. — Cet appareil (VII, .18) peut donner des déviations de plusieurs centimètres par volt si l'on emploie un fil de suspension très fin ($d < 0^{\text{cm}}, 01$), et si l'on rapproche les plateaux fixes à quelques millimètres de l'aiguille mobile. On charge les plateaux à une différence de



potentiel d'un assez grand nombre de volts et c'est l'aiguille qui est, ensuite, mise en communication successivement avec les points dont on cherche la différence de potentiel.

Comme pile de charge, on prend des éléments zinc-cuivre — eau

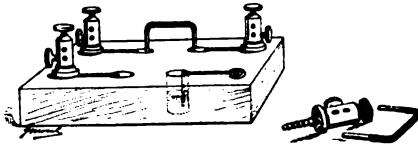


non distillée. Les vases de piles sont de petits bocaux en verre ($V = 30^{\text{cm}^3}$) alignés et fixés avec de l'arcanson sur une planche.

On y plonge des couples zinc-cuivre faits d'une lame de zinc (5^{cm} , 1^{cm} , 0^{cm} , 05) soudée à une lame de cuivre qui vont d'un vase à l'autre.

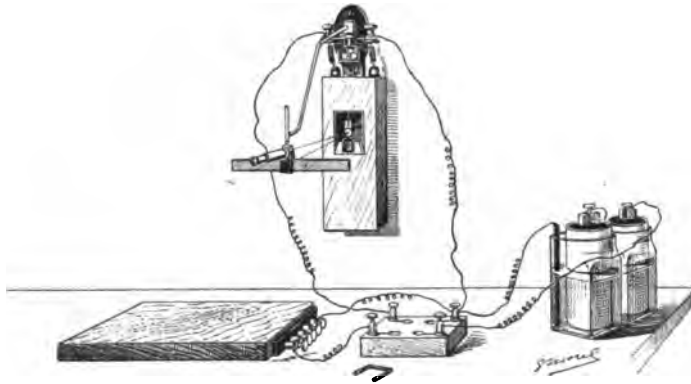
62. Emploi d'un condensateur et d'un galvanomètre balistique (¹). — *Montage.* — Pour construire le *commutateur* dont on va avoir besoin, on paraffine une planche (10^{cm} , 6^{cm} , 3^{cm}) et, vers le milieu, on perce des trous ($d = 0^{\text{cm}}$, 8 ; $h = 2^{\text{cm}}$) distribués aux sommets d'un carré (côté = 3^{cm}). On remplit à moitié ces trous avec du mercure et l'on y fait pénétrer des fils de cuivre ($d = 0^{\text{cm}}$, 1) serrés, d'autre part, sous des bornes fixées vers les angles de la planche (103, 175).

On prépare aussi des *ponts* conducteurs pour réunir les godets



de mercure. Ce sont des fils de cuivre ($d = 0^{\text{cm}}$, 2) pliés en \square que l'on recouvre à chaud d'une couche continue de cire à cacheter, sauf vers leurs extrémités.

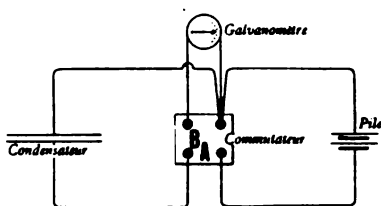
Réunir le commutateur à une pile Leclanché, au galvanomètre



et au condensateur, suivant les indications de la figure. Les con-

(¹) On fabrique pour l'industrie des condensateurs de un *microfarad* qui sont d'un prix peu élevé. On peut aussi se procurer à un prix relativement bas des galvanomètres à cadre mobile, à grande résistance, pouvant servir comme balistiques et qui donnent une impulsion de plusieurs divisions pour une décharge de un *microcoulomb*.

nexions seront établies au moyen de fil de sonnerie. Ces fils devront aller d'un appareil à l'autre sans traîner sur la table.



Les expériences consistent à placer d'abord le pont dans le commutateur en A, de façon à charger le condensateur au moyen de la pile, puis à le mettre en B pour décharger ce condensateur à travers le galvanomètre.

Si l'on se sert d'un *microfarad* divisé, on vérifiera d'abord que l'impulsion du galvanomètre est proportionnelle à la capacité que l'on décharge. — En employant ensuite deux ou trois éléments de piles montés en *tension* on vérifiera que l'impulsion obtenue au galvanomètre est la somme des impulsions que fourniraient séparément chacune des piles.

Pour s'assurer qu'il n'y a pas de déperditions sensibles, on établira les connexions de manière que le jeu du commutateur consiste à faire passer dans le galvanomètre le courant de charge du condensateur, et à mettre ensuite le condensateur en court-circuit pour la décharge. L'impulsion du galvanomètre devra être la même que lorsqu'il était traversé par le courant de décharge.

— Ayant fait ces vérifications, on mesurera les différences de potentiel aux bornes de différents éléments de piles en les comparant à la force électromotrice d'une pile étalon (VII, 93), au moyen des impulsions produites par la décharge du condensateur.

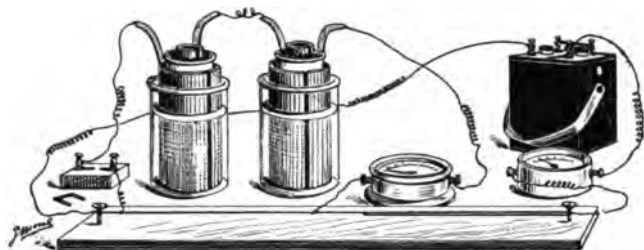
On contrôlera, en particulier, cette proposition que la différence de potentiel aux bornes d'une pile ne dépend pas des dimensions des électrodes, mais seulement de leur nature.

CHUTE DE POTENTIEL LE LONG D'UN FIL TRAVERSÉ PAR UN COURANT.

63. Expériences d'opposition. — *Montage.* — On envoie un courant dans un fil métallique, et l'on oppose la force électromotrice d'une pile à celle qui existe entre deux points du fil. On

place un galvanomètre dans le circuit dérivé et quand ce galvanomètre n'indique le passage d'aucun courant, c'est que les forces électromotrices comparées sont égales.

Le fil que l'on doit employer dépend des intensités de courant que l'on peut produire et mesurer. Si ces intensités sont de l'ordre de grandeur de l'ampère, on prend un fil de *manganine*.



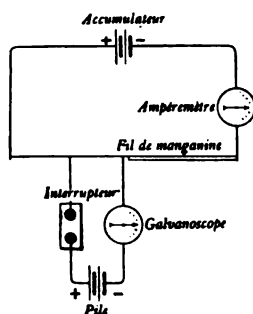
de $0^{\text{cm}},025$ de diamètre ($l=100^{\text{cm}}$), qu'on fixe le long d'une planche ($100^{\text{cm}}, 10^{\text{cm}}, 1^{\text{cm}}$), soit au moyen de *bornes*, soit en soudant ses extrémités à deux vis qu'on entre dans le bois. On soude en même temps sur ces vis des fils de cuivre qui servent à faire les connexions.

Le fil de *manganine* est doublé par un fil semblable sur la moitié de sa longueur, pour obtenir un conducteur de section double.

Le courant peut être fourni par un accumulateur double (4 volts); les forces électromotrices d'opposition sont celles de deux éléments Daniell; et l'on emploie comme instrument de zéro un galvanomètre quelconque, tel qu'un *galvanoscope-boussole* décelant les milliampères.

Dans le circuit du *galvanoscope* on intercale un interrupteur à mercure analogue à celui que nous avons décrit précédemment (VII, 62). Les connexions sont établies avec du fil de sonnerie suivant les indications de la figure, en ayant bien soin d'opposer les pôles des piles. Si le contact avec le fil tendu doit être pris en enroulant le fil de cuivre sur le fil de *manganine*, on emploiera pour ces contacts du fil de cuivre plus fin que pour les autres connexions ($d=0^{\text{cm}},05$).

Loi des longueurs. — Placer l'un des contacts près de l'ex-



trémité du fil et déplacer l'autre contact jusqu'à ce que le courant indiqué par le galvanoscope soit réduit à zéro.

Mesurer à un demi-millimètre près la longueur de fil sur laquelle on vient de trouver une force électromotrice égale à celle des deux éléments Daniell et noter l'intensité du courant.

Chercher de la même manière la longueur de fil correspondant à la force électromotrice d'un seul élément Daniell. Si l'intensité du courant est restée constante, cette longueur est exactement la moitié de la précédente (à moins de 1 pour 100 près).

Loi des sections. — Chercher sur le fil doublé la longueur correspondant à cette même force électromotrice de *un daniell*. On trouve, à moins de 1 pour 100 près, une longueur double de celle qu'on vient de mesurer.

Loi des intensités. — Réduire le courant principal de moitié, en ne le prenant plus que sur un seul accumulateur. Mesurer la nouvelle intensité et déterminer encore la longueur du fil de manganine sur laquelle on trouve la différence de potentiel de *un daniell*. Cette longueur a dû varier exactement en raison inverse de l'intensité du courant.

Si l'on dispose d'un rhéostat réglable ($0 < R < 10$ ohms) (VII, 80), on le placera dans le circuit des accumulateurs, et l'on fera varier progressivement sa résistance. On pourra alors répéter l'expérience précédente pour plusieurs valeurs de l'intensité, et construire la courbe représentative des variations observées.

Comparaison des forces électromotrices. — Remplacer la pile Daniell par une pile Volta, une pile Bunsen, une pile Leclanché ou un accumulateur et mesurer les longueurs du fil de manganine sur lesquelles existent des différences de potentiel égales à celles de ces piles. Les rapports de ces longueurs sont égaux aux rapports des forces électromotrices.

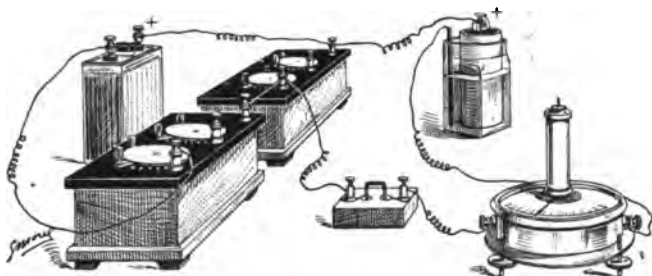
Polarisation des piles. — Pour éviter que les piles étudiées ne se *polarisent* pendant les tâtonnements (VII, 101), il convient d'intercaler une résistance aussi grande que possible dans leur circuit. On peut diminuer cette résistance à mesure que le réglage devient de plus en plus exact.

On a soin, en outre, de laisser le circuit de la pile étudiée constamment ouvert et de ne le fermer qu'un instant pour voir si l'équilibre des forces électromotrices est établi.

Expériences de déviations. — Aux deux bouts du fil étudié

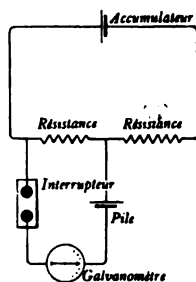
on attache des conducteurs aboutissant à un galvanomètre que l'on a mis en tension avec une très forte résistance. La déviation obtenue peut être considérée comme proportionnelle à la différence de potentiel qui existe entre les extrémités du fil étudié, et la mesure de cette déviation permet de contrôler les lois que nous venons d'établir (110, 157).

64. Potentiomètre à deux boîtes de résistances. — C'est un dispositif plus dispendieux, mais il est au moins aussi



précis et d'une manipulation plus commode que le *potentiomètre à fil* que nous venons de décrire. L'appareil se compose de deux boîtes de résistances semblables ($R > 1000$ ohms) mises en série dans le circuit d'une pile ou d'un accumulateur.

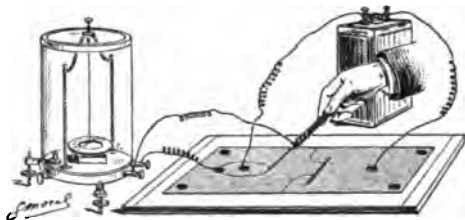
On s'astreint à faire varier ces deux résistances, de manière que leur somme soit constante. Le courant restant alors lui-même constant, la différence de potentiel aux bornes de l'une de ces boîtes est exactement proportionnelle à la valeur de sa résistance. C'est cette différence de potentiel que l'on oppose à celle que l'on veut mesurer, en intercalant un galvanomètre et un interrupteur dans le circuit dérivé.



65. Distribution des potentiels dans une nappe de courant. — *Montage.* — Coller une feuille de papier d'étain (35^{cm}; 25^{cm}; 0^{cm},001) sur une feuille de papier blanc. Mettre en dessous une feuille de *papier à reproductions* et une seconde feuille de papier blanc et fixer le tout sur une planche à dessin avec des punaises.

On amène le courant avec des fils métalliques soudés sur la tête de deux autres *punaises* que l'on pique à environ 10^{cm} des

bouts de la feuille conductrice. Le courant doit être de l'ordre de grandeur de $\frac{1}{2}$ ampère; il peut être fourni par une pile Daniell ou un accumulateur. On évite l'emploi d'un rhéostat auxiliaire



en faisant les jonctions avec du fil de *manganine* de longueur convenable ($d = 0^{\text{cm}}, 025$).

Les prises de potentiel se font avec deux fils de cuivre. L'un d'eux est soudé sur la tête d'une *punaise*, l'autre sur une tige métallique ($d = 0^{\text{cm}}, 3$) à pointe très émoussée, tenue par un manche en bois. On attache les extrémités libres de ces deux fils de cuivre aux bornes d'un galvanomètre pouvant déceler le millième de volt.

Les *galvanomètres de Nobili* à gros fil, que l'on trouve encore dans bien des laboratoires, donnent une déviation de plusieurs degrés pour $\frac{1}{1000}$ de volt. Ils pourront être employés pour cette expérience sans qu'il soit nécessaire d'amplifier leurs déviations à l'aide d'un miroir. Si l'on veut se servir d'un galvanomètre à cadre mobile, on le trouve, en général, trop sensible. On ramène alors sa sensibilité à la valeur convenable en mettant en dérivation entre les bornes du galvanomètre, un fil métallique d'une résistance dix ou cent fois plus petite que celle du cadre mobile.

Expériences. — Piquer en un point fixe la punaise qui sert de prise de potentiel et placer successivement la tige mobile en des points tels qu'il ne passe aucun courant dans le galvanomètre. On marque chacun de ces points sur le papier en appuyant avec la tige. Le lieu des points ainsi marqués est une ligne équipotentielle.

On tracera de cette manière plusieurs courbes équipotentielles et l'on étudiera leurs changements de forme depuis les lignes circulaires qui entourent chacune des électrodes jusqu'à la ligne équipotentielle médiane qui est rectiligne.

On observera, en particulier, que les lignes équipotentielles aboutissent normalement aux contours de la feuille de papier d'étain.

— Pour déterminer la valeur du potentiel sur chacune des courbes tracées, on procède de proche en proche en évaluant successivement les différences de potentiel entre deux courbes voisines. Chacune de ces différences de potentiel sera mesurée avec une même unité arbitraire, en admettant qu'elle est proportionnelle à la déviation que l'on obtient au galvanomètre quand on fait les deux prises de potentiel sur l'une et sur l'autre courbe.

— Faire au canif, dans la nappe conductrice, une *coupure* (10^{cm}; 0^{cm}, 1) dirigée suivant la ligne équipotentielle médiane. On constate alors que les lignes équipotentielles se déforment en se resserrant beaucoup sur les bords de la coupure. Certaines d'entre elles sont composées de deux branches distinctes qui aboutissent normalement aux bords de la coupure et aux contours de la feuille de papier d'étain.

On trouve, au contraire, que les lignes équipotentielles ne sont pas modifiées si la coupure a été pratiquée suivant une *ligne de courant*, normale aux lignes équipotentielles.

— On constatera encore que la forme des lignes équipotentielles n'est pas altérée, si l'on recouvre d'une deuxième feuille d'étain toute une région de la nappe conductrice *limitée à deux lignes équipotentielles*, de manière à en doubler la conductibilité. La chute de potentiel sur cette région de la lame est seule modifiée.

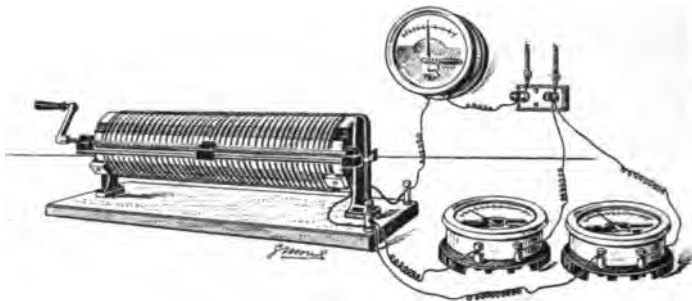
— Pour une expérience de cours, la feuille de papier d'étain sera remplacée par une feuille de zinc (100^{cm}; 100^{cm}; 0^{cm}, 05) fixée contre le tableau noir. On y enverra encore un courant de l'ordre de grandeur de l'ampère et l'on explorera les potentiels avec deux tiges reliées à un galvanomètre à cadre mobile (175).

COURANTS DÉRIVÉS.

66. Conservation de l'intensité. — Mettre deux ampèremètres *en série* dans le circuit d'une source d'électricité et placer un troisième ampèremètre *en dérivation* sur l'un des deux premiers. Le circuit principal doit comprendre, en outre, un rhéostat pour que l'on puisse amener les intensités des courants à se trouver dans les limites d'emploi des ampèremètres.

L'intensité du courant total est égale à la somme des intensités des courants dérivés.

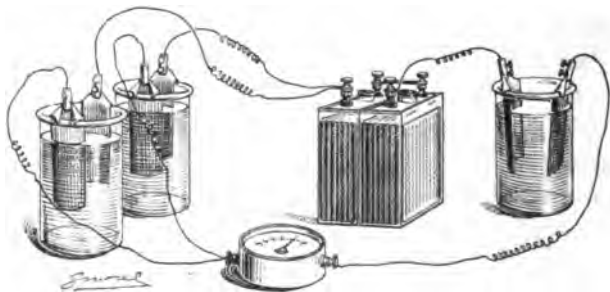
La concordance des nombres obtenus ne dépend que de l'exacti-



tude avec laquelle les ampèremètres ont été gradués et cette expérience fournit, même, un excellent contrôle de la graduation.

67. Mesures électrolytiques. — *Montage.* — La vérification peut se faire avec un dispositif moins dispendieux, en faisant appel aux phénomènes d'électrolyse (126).

On construit trois voltamètres à sulfate de cuivre, dans lesquels on met une solution contenant 10 pour 100 de sulfate de cuivre et



5 pour 100 d'acide sulfurique. On prend comme électrodes des lames de cuivre (12^{cm} ; 5^{cm} ; $0^{\text{cm}}, 05$). On les ploie légèrement pour leur faire épouser à peu près la forme du vase de verre qui les contient ($h = 13^{\text{cm}}$; $d = 8^{\text{cm}}$), et l'on courbe les angles supérieurs de façon que ces lames s'accrochent sur le bord des vases.

Le courant est amené aux électrodes par des *serre-lames* à vis que l'on peut obtenir en pratiquant, avec la scie à métaux, une fente longitudinale à mi-épaisseur d'un nombre égal de *serre-fils*.

Les connexions entre les trois voltamètres sont établies comme celles que l'on avait établies entre les ampèremètres pour l'expérience précédente.

L'intensité du courant ne devra pas dépasser 1 ampère par déci-

mètre carré de surface d'électrode. Il est donc utile de placer un ampèremètre dans le circuit principal. Le réglage de l'intensité est assuré soit par l'emploi d'un rhéostat, soit plus simplement en prenant une source d'électricité ayant environ 4 volts de force électromotrice (2 accumulateurs) et en faisant la jonction de ces éléments et des voltamètres avec du fil de *manganine* d'une longueur telle que l'intensité ait la valeur voulue ($d = 0^{\text{cm}}, 025$; $l = 35^{\text{cm}}$).

Expériences. — Nettoyer les électrodes avec du papier émeri, les laver à l'eau de savon, puis à l'eau pure, rincer et sécher ces lames avec du papier filtre. Peser ensuite chacune d'elles sur une balance donnant au moins le *demi-centigramme*.

Établir les connexions et laisser passer le courant pendant environ une demi-heure, pour déposer une masse suffisante de cuivre. Aussitôt le courant arrêté, laver abondamment les électrodes, les sécher avec du papier filtre et les peser.

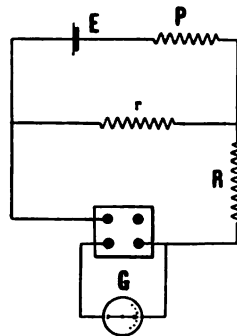
Le poids du cuivre déposé sur l'électrode négative du circuit principal est-il égal à la somme des poids de cuivre déposés dans les deux circuits dérivés? La perte de poids des électrodes positives est-elle égale au gain des électrodes négatives correspondantes?

— La masse de métal obtenue est presque quatre fois plus forte quand on peut utiliser un voltamètre à azotate d'argent. On emploie alors une solution de nitrate d'argent à 10 pour 100 exactement neutre.

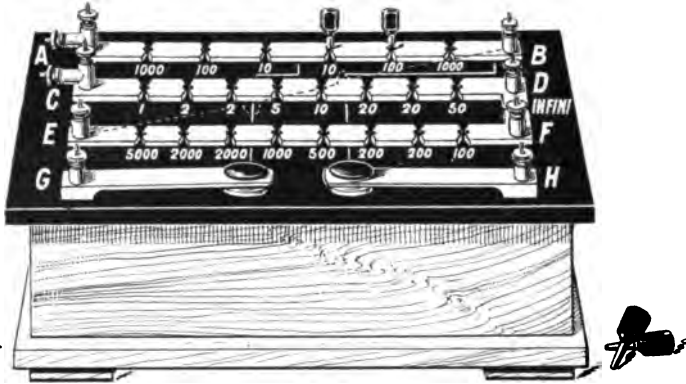
68. Graduation d'un galvanomètre. *Montage.* — Supposons qu'il s'agisse d'un galvanomètre à cadre mobile sensible au dixième de micro-ampère. Mettons dans le circuit de ce galvanomètre une résistance fixe, R , de 2000 ohms et une résistance variable r de quelques ohms. Cette résistance variable fera aussi partie du circuit d'une pile Daniell; et nous mettrons encore dans ce dernier circuit une résistance fixe P d'un millier d'ohms.

Toutes ces résistances peuvent être prises sur une même boîte de résistances, si cette boîte est, par exemple, une *boîte à pont* où les connexions seraient celles que représente la figure de la page 234, avec le conducteur intérieur BE.

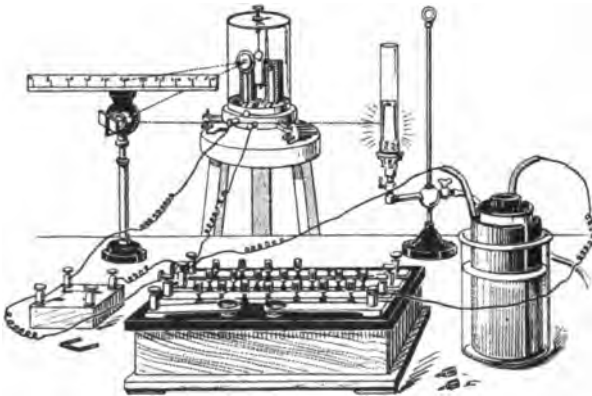
La résistance variable sera CD, et les résistances fixes du galva-



nomètre et de la pile seront respectivement AB et EF. On reliera les points B et D par un fil de cuivre court et l'on attachera les fils de jonction du galvanomètre en A et C et ceux de la pile en C et F, en laissant subsister la *coupure* entre D et F, de manière à réaliser les connexions indiquées sur le diagramme précédent.



On facilite les mesures en interrompant le circuit du galvanomètre par un commutateur à godets de mercure (**VII, 62**) qui



permet soit d'établir ou de supprimer le courant dans le galvanomètre, soit de mettre ce galvanomètre en court-circuit pour amortir ses oscillations.

Expériences. — Réduire à zéro la résistance r sur laquelle le galvanomètre est en dérivation et noter la position d'équilibre. Faire croître ensuite la résistance r en notant les déviations correspondantes, jusqu'à ce que ces déviations atteignent la limite de

l'échelle. Les intensités de courant seront ultérieurement calculées au moyen de la formule

$$i = E \frac{r}{P(R + G) + r(G + R + P)},$$

et l'on construira la courbe donnant les valeurs des intensités en fonction des déviations. Cette courbe s'écarte extrêmement peu d'une droite, au moins pour les faibles déviations.

— Si la résistance G du galvanomètre n'est pas connue, on la détermine sur place. A cet effet, on réduit à zéro la résistance R que l'on avait ajoutée au galvanomètre et l'on note la déviation obtenue pour une valeur r' de la résistance en dérivation. Se reportant aux mesures précédentes, on trouve la valeur r_1 de cette résistance qui, dans le premier montage, aurait donné la même déviation. La valeur de G est alors

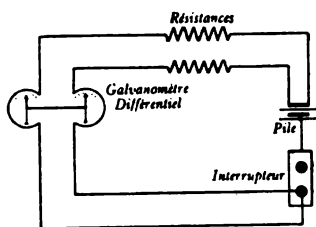
$$G = \frac{r'R(P + r_1)}{P(r_1 - r')}.$$

— Ces expériences donnent une graduation qui est correcte à environ 1 pour 100 près.

Si l'on voulait une plus grande précision, il conviendrait d'employer une force électromotrice d'environ 2 volts et l'on devrait, au cours des mesures, déterminer par une méthode d'opposition quelle est la fraction de cette force électromotrice qui équilibre la force électromotrice d'un élément étalon (VII, 64 et 93).

69. Galvanomètre différentiel. — Un galvanomètre *différentiel* porte deux enroulements que l'on a cherché à rendre identiques. Si l'on envoie dans les deux circuits des courants de sens contraires, l'équipage mobile reste au repos quand ces courants sont égaux, ou, du moins, quand ils sont dans un rapport déterminé, d'ailleurs très voisin de l'unité.

Si ces deux courants sont empruntés à une même force électromotrice, l'équilibre est établi quand le rapport des résistances totales des deux circuits est égal à cette constante qui caractérise l'appareil.



Détermination de la constante du galvanomètre. — Ajouter une résistance réglable de un millier d'ohms à chacun des deux

circuits, supposés peu résistants, et mettre ces deux circuits en dérivation sur une même pile, en intercalant un interrupteur dans leur partie commun

Essayer de régler l'une des résistances de manière que l'équipage mobile du galvanomètre reste au zéro quand on fait passer les courants (1). On trouve, en général, que le réglage exact est impossible. On note alors les déviations D et G qui se produisent à droite et à gauche pour deux valeurs de la résistance différant d'une unité et l'on interpole entre ces deux valeurs, c'est-à-dire que l'on admet que l'équilibre aurait lieu pour une fraction d'unité égale à $\frac{D}{D+G}$.

Changer ensuite notablement les résistances qui se trouvent dans les deux circuits du galvanomètre et rétablir l'équilibre. La constante du galvanomètre est égale au rapport des *variations* de résistance des deux circuits.

Mesure d'une résistance. — Placer la résistance à mesurer dans l'un des circuits, mettre dans l'autre circuit une résistance réglable et grouper les deux circuits en dérivation sur une même force électromotrice.

Si la résistance de chacun des circuits du galvanomètre est très faible, on peut admettre, en première approximation, que la valeur de la résistance inconnue est égale à la valeur qu'il faut donner à la résistance variable pour établir l'équilibre.

— Si l'on veut avoir plus de précision, on opère comme pour une double pesée. Après avoir établi l'équilibre, on retire la résistance inconnue et on la remplace par une boîte de résistances graduées avec lesquelles on rétablit l'équilibre du galvanomètre différentiel. Les deux résistances qui ont pu être ainsi substituées l'une à l'autre sont nécessairement égales.

On pourrait aussi retirer la résistance inconnue, chercher de combien on doit faire varier l'autre résistance pour rétablir l'équilibre, et multiplier la valeur trouvée par la *constante* du galvanomètre.

(1) Quand les résistances sont réglées comme elles doivent l'être, il se peut que le galvanomètre dévie quand on ferme le circuit. Cette déviation est due aux phénomènes d'induction; elle n'est que temporaire et le galvanomètre oscille ensuite autour de sa position d'équilibre réelle.

MESURES DE RÉSISTANCES PAR LE PONT DE WHEATSTONE.

70. Construction d'une série de résistances graduées.

— Se procurer du fil de manganine ou de maillechort isolé à la soie ($d = 0^{\text{cm}}, 025$) et en couper une longueur supérieure de quelques centimètres à celle qui doit représenter 1 ohm (environ 18^{cm}). Souder aux deux bouts de ce fil de petites tiges de cuivre ($l = 5^{\text{cm}}; d = 0^{\text{cm}}, 2$), en laissant au fil juste la longueur voulue pour que sa résistance soit de 1 ohm .

Préparer de la même manière deux fils de longueur exactement double et un fil de longueur exactement quintuple, puis deux autres séries de fils respectivement dix fois et cent fois plus longs que ceux-ci.

Après avoir été doublés, ces fils seront enroulés sur des bouchons de liège ($h = 4^{\text{cm}}; d = 2^{\text{cm}}$) en arrêtant les extrémités dans des fentes pratiquées au canif dans le bouchon, ou en les fixant avec une goutte d'un mastic fusible (**I, 92**).

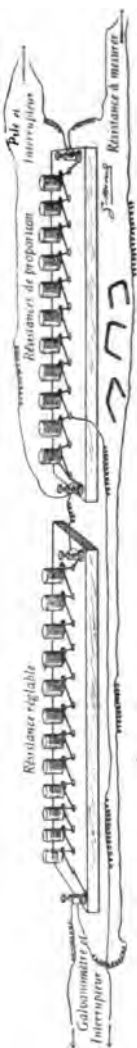
Coller ces 12 bobines les unes à côté des autres, sur un planche un peu épaisse ($40^{\text{cm}}; 7^{\text{cm}}; 3^{\text{cm}}$) en bois paraffiné le long de laquelle on a percé 13 trous équidistants ($h = 2^{\text{cm}}; d = 0^{\text{cm}}, 8$). Les fils de cuivre qui terminent chaque bobine sont plongés dans ces trous où l'on met une goutte de mercure.

Les connexions sont établies, d'un mercure au suivant, au moyen de cavaliers formés d'un fil de cuivre ($d = 0^{\text{cm}}, 2$) en forme de \square , dont le milieu est couvert de cire à cacheter.

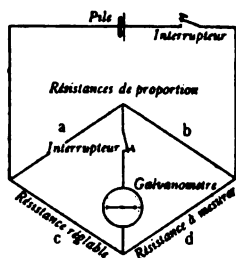
Les prises de courant peuvent se faire par les contacts de mercure extrêmes. Il est plus commode de terminer l'appareil par deux bornes vissées dans la planche; on y fixe des fils de cuivre qui plongent dans le mercure.

— Construire encore, de la même manière, une seconde série comprenant onze bobines de 10 ohms chacune.

— Avec ces deux séries de résistances graduées, on a les éléments nécessaires pour constituer un *pont de Wheatstone*.



La première série de résistances forme la branche *c* du pont. Les deux résistances de proportion, *a* et *b*, sont prises sur la série des résistances égales, ce qui permet de réaliser les rapports $\frac{1}{10}$, $\frac{2}{9}$, $\frac{3}{8}$, etc., et même des rapports descendant jusqu'à $\frac{1}{100}$, si l'on met plusieurs de ces résistances en parallèle.



Les connexions nécessaires entre les résistances sont établies avec du fil de cuivre un peu gros ($d \geq 0^{\text{cm}}, 1$) pour n'introduire que des résistances parasites négligeables (78).

Intensité du courant. — Avec un pont de Wheatstone, construit comme nous venons de le dire, il n'y a aucun inconvénient à prendre comme source d'électricité un élément Daniell ou un accumulateur et à employer des courants de l'ordre du dixième d'ampère.

Dans les boîtes de résistance plus précises, il ne faut pas que l'intensité des courants dépasse un centième d'ampère.

Dans tous les cas il convient d'avoir un interrupteur sur le circuit de la pile pour que le courant passe le moins longtemps possible dans les résistances. Un autre interrupteur placé sur le circuit du galvanomètre permet de ne mettre ce galvanomètre en circuit qu'après la fermeture du courant de la pile, alors que les effets d'induction ont disparu.

71. Étalonnage d'une boîte de résistances avec un pont de Wheatstone. — On se procure une résistance auxiliaire de *une unité* et l'on commence par déterminer le rapport de cette résistance et de la résistance *unité* de la boîte étudiée.

Il suffit pour cela de prendre successivement ces deux résistances comme résistance inconnue dans le montage de pont de Wheatstone que représente la figure. Le rapport des deux valeurs que l'on doit donner successivement à la résistance réglable pour rétablir l'équilibre est égal au rapport des deux résistances que l'on veut comparer.

On choisit, dans cette mesure, un rapport des résistances de proportion aussi grand que possible, pour que les valeurs de la résistance réglable soient elles-mêmes aussi grandes que possible. Ces deux valeurs sont, en effet, presque égales, et c'est leur différence qu'il s'agit de mettre en évidence.

— Ayant déterminé le rapport des deux *unités* on compare chacune des résistances *deux* de la boîte de résistances avec la

résistance *deux* que l'on obtient en ajoutant l'unité auxiliaire à l'unité de la boîte.

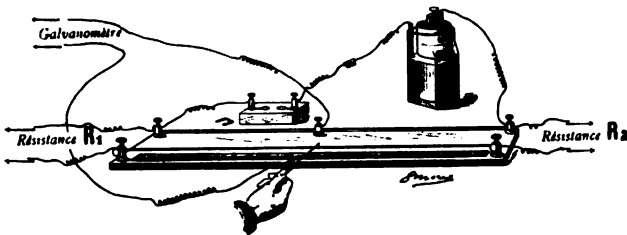
On compare ensuite la résistance 5 de la boîte à la somme des résistances ($1 + 2 + 2$) que l'on vient d'étalonner; et l'on continue ainsi de proche en proche, en comparant successivement chacune des résistances à la somme, nominalement égale, des résistances qui la précèdent et dont on a déjà la valeur.

— Dans ces mesures, comme dans toutes celles du même genre, on n'arrive jamais à établir exactement l'équilibre. Pour une valeur déterminée de la résistance variable, le galvanomètre dévie d'un côté; pour une unité de plus, il dévie de l'autre côté, et l'on *inter-pole* entre ces deux valeurs (**VII, 69**).

Sensibilité. — Si les deux résistances que l'on compare et si les résistances qui constituent le pont ne sont exactes qu'à 1 pour 100 près, la *différence* des deux résistances comparées ne pourra être connue qu'à environ 1 pour 100 de sa valeur. Mais comme cette différence, elle-même, est inférieure au centième de la valeur de chacune d'elles, il s'ensuit que le *rapport* des résistances est déterminé au *dix-millième* de sa valeur.

— Pour pouvoir obtenir cette précision du *dix-millième*, comme on se sert d'une force électromotrice de l'ordre du volt, il est nécessaire que le galvanomètre décèle le courant que fournit un dix-millième de volt dans une résistance de l'ordre des dizaines d'ohms; il doit donc être sensible au *millionième d'ampère*. C'est précisément le cas des galvanomètres à cadres mobiles que l'on construit pour les besoins courants de l'industrie.

72. Comparaison de deux résistances très voisines au moyen du pont à fil. — *Montage.* — Tendre sur une planche un fil de manganine ($l = 100\text{cm}$, $d = 0\text{cm}, 1$) que l'on attache soit à



des bornes, soit à des vis fixées dans la planche. Fixer en dessous du fil un *mètre* divisé en centimètres.

Mettre en circuit, de part et d'autre de ce rhéostat, les deux résistances R_1 et R_2 que l'on veut comparer. Relier les extrémités libres de ces résistances aux deux pôles d'une pile ou d'un accumulateur, en intercalant un interrupteur dans le circuit. Ces résistances, augmentées chacune d'une partie de la résistance du fil de manganine, vont former deux des branches d'un pont de Wheatstone.

Les deux autres branches du pont sont des résistances auxiliaires valant quelques ohms et aussi égales que possible. On met ces deux résistances en série et l'on relie leurs extrémités libres à la pile et à l'interrupteur, comme on vient de le faire pour les résistances à comparer.

On peut constituer ces résistances auxiliaires par des longueurs égales de fil de manganine qui seront fixées sur la même planche que le rhéostat.

Le galvanomètre est placé entre le point de jonction des résistances auxiliaires et un point variable du fil de manganine. La prise de potentiel sur le fil de manganine se fait avec un fil de cuivre mobile que l'on manœuvre au moyen d'un manche en bois, afin que le contact des doigts ne vienne pas créer une force électromotrice thermoélectrique en échauffant le point où les fils de cuivre et de manganine se touchent.

Expériences. — Fermer le circuit de la pile et noter le point du fil de manganine où l'on doit faire aboutir le fil mobile venant du galvanomètre pour que cet instrument ne soit traversé par aucun courant.

Permuter ensuite les deux résistances que l'on compare et rétablir l'équilibre en déplaçant le contact mobile.

La résistance de la portion de fil comprise entre les deux points de contact est égale à la différence des deux résistances étudiées.

— On peut déterminer une fois pour toutes la résistance de l'unité de longueur du fil en mesurant la résistance de ce fil à l'aide d'un pont de Wheatstone.

On peut aussi envoyer dans ce fil un courant d'environ un ampère, dont l'intensité soit telle que la différence de potentiel entre les extrémités du fil compense la force électromotrice d'une pile étalon (**VII, 63**). L'intensité du courant est mesurée au moyen d'un voltamètre (**VII, 83**); et la valeur de la résistance cherchée est alors le quotient des nombres qui mesurent la différence de potentiel et l'intensité.

73. Couplage des conducteurs. — Mesurer séparément avec un pont de Wheatstone deux résistances voisines respectivement de 10 ohms et de 20 ohms. Mesurer ensuite les résistances que l'on obtient en les couplant d'abord *en série* puis *en parallèle*.

La résistance trouvée dans le second cas est-elle la somme des résistances individuelles? Dans le dernier couplage, au contraire, l'inverse de la résistance mesurée est-il la somme des inverses des deux résistances primitives?

— Si les résistances que l'on vient d'étudier sont des résistances déjà étalonnées, on profitera de ces mesures pour vérifier qu'entre les résistances des quatre branches du pont, la relation

$$\frac{a}{b} = \frac{c}{d}$$

se trouve vérifiée au moment de l'équilibre.

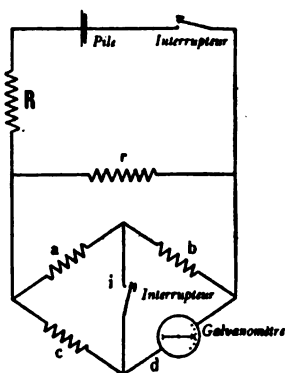
74. Résistance d'un galvanomètre. — Modifier les connexions d'un pont de Wheatstone comme l'indique la partie inférieure du diagramme ci-contre. Autrement dit, attacher les fils du galvanomètre là où l'on attachait primitivement les extrémités de la résistance à mesurer, et placer simplement un interrupteur dans le circuit où se trouvait d'abord le galvanomètre.

On prend des résistances de proportions égales si le galvanomètre a une résistance d'une centaine d'ohms. On prend, au contraire, un rapport 10:1 ou même 100:1 si le galvanomètre est très résistant; et le rapport inverse si le galvanomètre est à faible résistance.

Ce montage exposerait à envoyer dans le galvanomètre un courant exagéré. Si cet appareil est très sensible, il ne faut donc se servir que d'une fraction de la force électromotrice de la pile. On met alors dans le circuit de la pile deux résistances très inégales ($R > r$); et ce sont les extrémités de la résistance r que l'on relie au pont de Wheatstone (159).

Expériences. — Les appareils étant ainsi disposés, on donne au rapport $\frac{r}{R}$ une valeur telle qu'en fermant le circuit de la pile, la

A., II.

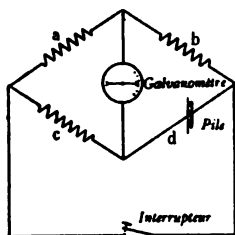


déviations du galvanomètre soit un peu grande. Si l'on vient alors à fermer l'interrupteur I, cette déviation augmente ou diminue, selon que la résistance variable c est plus grande ou plus petite que la valeur $d \frac{a}{b}$ qu'on va chercher à réaliser.

On trouve rapidement la valeur de c pour laquelle la variation de déviation passe de $+n$ à $-p$ quand c augmente de une unité. On admet alors que l'équilibre aurait été obtenu pour la valeur $c + \frac{n}{n+p}$.

La résistance du galvanomètre est égale à cette valeur multipliée par le rapport $\frac{a}{b}$.

75. Résistance intérieure d'une pile. — Mettre la pile à



la place que la résistance à mesurer occupe d'ordinaire dans un pont de Wheatstone; mettre un interrupteur sur le circuit qu'aurait occupé la pile dans le montage habituel et laisser le galvanomètre à sa place normale. Le diagramme ci-contre représente ces connexions.

On observe dans le galvanomètre une déviation permanente. Si l'on vient alors à fermer l'interrupteur placé sur la diagonale conjuguée du pont, cette déviation augmente ou diminue selon que la valeur c de la résistance réglable s'écarte dans un sens ou dans l'autre de la valeur $d \frac{a}{b}$.

Lorsque la résistance variable aura été réglée de manière que le courant dans le galvanomètre ne dépende plus de la manœuvre de l'interrupteur, on pourra calculer la valeur de la résistance de la pile au moyen de la formule

$$d = c \frac{a}{b}.$$

Dans ces mesures, il faut que les courants fournis par la pile soient aussi faibles que possible pour atténuer les phénomènes de polarisation. On est donc conduit à opérer avec des résistances aussi grandes que le comporte le matériel dont on dispose.

Malgré ces grandes résistances, si le courant est encore n fois plus fort que ce que peut mesurer le galvanomètre, il faudra *shunter* cet instrument au moyen d'un conducteur en dérivation dont la résistance soit $(n - 1)$ fois plus petite que celle du galvanomètre,

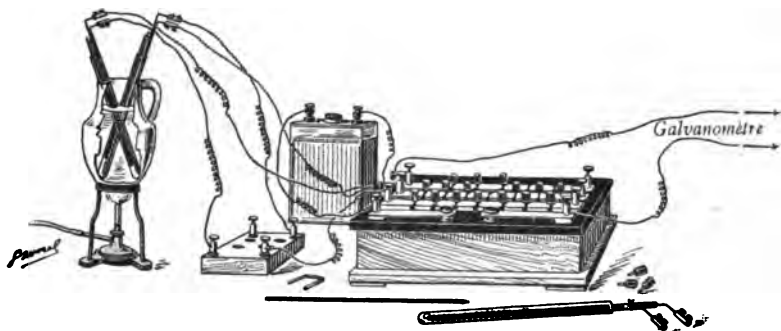
afin que cet instrument ne soit plus traversé que par la $n^{\text{ième}}$ partie du courant.

— On vérifiera que la résistance de la pile augmente quand on diminue la hauteur des électrodes ou quand on augmente leur écartement, ou bien quand on remplace les liquides de la pile par des solutions d'une plus grande résistivité (*voir* les Tableaux numériques).

— Après avoir mesuré séparément les résistances de deux éléments de piles de même espèce (éléments Daniell) on mesurera la résistance de la pile obtenue par le couplage de ces éléments soit en tension, soit en surface. On devra vérifier que les résistances se sont ajoutées dans le premier cas, et que ce sont les conductibilités qui s'ajoutent, au contraire, dans le second cas (176).

76. Variation de résistance des métaux avec la température. — *Montage.* — Les fils de cuivre rouge et de maillechort ou de manganine que l'on veut comparer ($l = 80^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}},02$) sont soudés par leurs extrémités à de gros fils de cuivre ($d = 0^{\text{cm}},2$; $l = 20^{\text{cm}}$) qui servent pour les connexions.

Enrouler chaque fil fin en hélice sur un tube de verre ($l = 30^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}},8$) en spires bien séparées allant de l'un des bouts du tube



jusqu'à quelques centimètres de l'autre bout. Les spires extrêmes sont immobilisées contre le tube par une ligature en fil de cuivre ($d = 0^{\text{cm}},1$), et le fil fin revient en arrière à l'intérieur du tube.

Placer chacune des résistances ainsi préparées dans un tube à essais ($d = 2^{\text{cm}},5$; $l = 30^{\text{cm}}$) où l'on verse de l'*huile lourde* et mettre ces deux tubes dans une bouillotte ($V = 2^{\text{l}}$) contenant assez d'eau pour pouvoir chauffer les deux résistances.

Expériences. — Mesurer d'abord la résistance de chacun des

deux fils à la température ambiante en déterminant leur température avec un thermomètre plongé dans l'huile.

Ces mesures seront faites avec un pont de Wheatstone (**VII, 71**) en prenant des résistances de proportion dans un rapport égal à 100.

Chauffer ensuite le bain et faire de nouvelles déterminations jusqu'au voisinage de 100°. Au moment de chaque mesure, on modère le chauffage de façon que les températures varient peu.

Il est bon, pour terminer, de reprendre les valeurs des résistances à la température ambiante pour s'assurer de leur retour à leur valeur initiale.

Construisant alors la courbe de variation des résistances, on constate que les variations du maillechort ou de la manganine sont à peine sensibles alors que la résistance du cuivre a un coefficient de variation voisin du coefficient de dilatation des gaz.

— Si l'on dispose d'anhydride carbonique solide ou d'air liquide, on complétera ces mesures par une expérience à basse température, que l'on fera en plongeant les résistances dans l'air liquide ou dans un mélange fluide de neige carbonique et d'*acétone*.

77. Emploi du téléphone. — Dans toutes les mesures de résistances par le pont de Wheatstone, on peut remplacer le galvanomètre par un récepteur téléphonique, puisque cet appareil permet aussi de déceler des courants de l'ordre du millionième d'ampère.

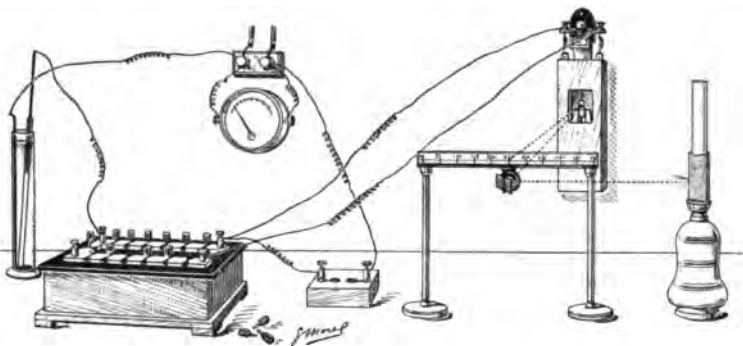
Pour constater l'équilibre, on doit produire de rapides variations de résistance dans le circuit du téléphone. On gratte, par exemple, les deux extrémités libres du circuit l'une contre l'autre, ou bien on passe rapidement le bout de l'un des fils sur une *lime* reliée à l'autre fil. On entend alors dans le téléphone des sons qui ne s'éteignent que quand il n'y a plus de différence de potentiel (157, 202).

RÉSISTANCE DES ÉLECTROLYTES.

78. Mesures d'intensités. — *Montage.* — On met une colonne cylindrique de l'électrolyte dans un circuit contenant une force électromotrice connue, et l'on mesure l'intensité du courant. Pour que la méthode soit correcte à 2 ou 3 pour 100 près, il faut que l'on dispose d'au moins une trentaine de volts afin que l'on

puisse négliger les chutes de potentiel dues à la polarisation des électrodes.

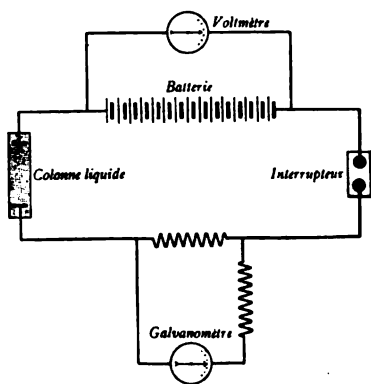
On réalise la colonne conductrice en plaçant un tube de verre ($l = 35\text{cm}$; $d = 0\text{cm},8$ ou $d = 0\text{cm},5$) dans une éprouvette graduée ($V = 500\text{cm}^3$) pleine du liquide étudié. Le courant est amené en bas de l'éprouvette par un fil de cuivre nu ($d = 0\text{cm},1$) soudé à une



lampe de cuivre rouge qui occupe le fond du vase et l'on reprend ce courant en haut du tube au moyen d'un autre fil de cuivre qu'on peut faire pénétrer plus ou moins profondément dans le liquide.

Mettre dans le circuit de la batterie de piles ou d'accumulateurs : 1° cette résistance liquide ; 2° un interrupteur ; 3° une résistance variable, de quelques ohms, prise sur une boîte de résistances, et, en dérivation sur celle-ci, le circuit d'un galvanomètre à cadre mobile, lesté par une résistance assez forte, de l'ordre des milliers d'ohms, prise sur la même boîte de résistances.

Un voltmètre, placé directement en dérivation sur les bornes de la source d'électricité (1), permettra de s'assurer que le passage



(1) Si le voltmètre a une résistance de l'ordre des milliers d'ohms, on pourra mesurer l'intensité du courant sans avoir besoin de se servir d'un galvanomètre. Il suffira de mettre le voltmètre dans le circuit de la résistance liquide.

Si v est le nombre de volts qu'indique alors l'appareil et si V est le nombre de volts total, la résistance de la colonne liquide sera égale à celle du voltmètre multipliée par le rapport $\frac{V-v}{v}$.

des courants très faibles que l'on emploie ne fait pas varier visiblement la différence de potentiel aux bornes. On aura soin, enfin, de ne pas maintenir le circuit fermé trop longtemps pour éviter que le passage du courant n'échauffe le liquide et ne modifie sa résistance.

Proportionnalité du courant et de la force électromotrice.

— Remplir l'éprouvette avec une solution de sulfate de cuivre (1 pour 100) et noter l'indication du galvanomètre. Changer ensuite le nombre des accumulateurs employés en passant, par exemple, de 60 volts à 30 volts. Le courant, mesuré par le galvanomètre, varie-t-il proportionnellement aux différences de potentiel indiquées par le voltmètre?

Loi des longueurs. — Mettre dans l'éprouvette un tube de verre de 0^{cm},5 de diamètre intérieur, et placer le fil conducteur dans ce tube, en l'enfonçant très peu dans le liquide. Régler les résistances du circuit du galvanomètre de manière à avoir une déviation d'environ 5^{cm}, facile à mesurer. Noter cette déviation et relever, sur la graduation de l'éprouvette, la longueur du tube que l'on utilise.

Diminuer progressivement la longueur de la colonne liquide, en enfonçant de plus en plus profondément le fil de cuivre, et répéter les mesures pour chaque valeur de la résistance.

Construire la courbe représentant les inverses des intensités mesurées en fonction des longueurs correspondantes des colonnes liquides.

Cette courbe est-elle rectiligne? Semble-t-elle tendre vers l'origine? Y a-t-il lieu de faire une correction pour tenir compte des résistances qui se trouvent dans le même circuit que la colonne liquide?

Loi des sections. — Répéter des mesures semblables avec une même longueur de colonne liquide, en employant un tube de 0^{cm},8 de diamètre intérieur au lieu du tube de 0^{cm},5 de diamètre. Mesurer les diamètres de ces tubes avec le double-décimètre en évaluant les fractions de millimètre.

Le rapport des résistances, déduit des mesures électriques, est-il égal au rapport inverse des sections des tubes?

— Si l'on connaît la valeur des courants qu'indiquent les déviations du galvanomètre (**VII, 68**), on pourra déduire de ces mesures la valeur absolue des résistances liquides utilisées. On calculera notamment ce que serait la résistance d'une colonne de ce

liquide qui aurait 1 cm^2 de section et 1 cm de longueur. Combien de fois cette *résistivité* est-elle plus grande que celle du cuivre?

Influence de la température. — Reprendre la mesure de résistance avec le même liquide que l'on aura fait chauffer au préalable dans un ballon de verre. La résistance du liquide a *diminué* dans une forte proportion, elle augmente ensuite progressivement à mesure que le liquide se refroidit. On construira la courbe des variations de résistance en fonction de la température.

Influence de la concentration. — Pour les fortes concentrations, on garde les dispositifs des expériences précédentes. Le tube de verre dans lequel on mesure la résistance est pris d'autant plus étroit que la concentration est plus grande.

Pour les concentrations les plus faibles, au contraire, on prend tout le contenu de l'éprouvette graduée comme colonne liquide. Le fil qui conduit le courant au bas de l'éprouvette est alors entouré d'un tube de verre qui le protège contre le contact du liquide et l'on reprend le courant à la surface de ce liquide au moyen d'une plaque de cuivre soudée au bout d'un autre fil de cuivre que l'on accroche sur le bord de l'éprouvette.



On commence par déterminer la résistance de l'éprouvette pleine d'eau distillée. La résistivité des eaux distillées ordinaires est de l'ordre du mégohm-centimètre.

On ajoute ensuite, et successivement, à cette eau distillée, par doses de quelques centimètres cubes, des volumes mesurés d'une solution à 1 pour 100 de sulfate de cuivre.

On mesure la *conductance* $\left(\frac{1}{R}\right)$ de la solution pour chacune des concentrations, et l'on en retranche la conductance de l'eau distillée que l'on a mesurée tout à l'heure. L'accroissement de conductance est-il proportionnel à la concentration en sulfate de cuivre?

En comparant les résultats ainsi obtenus avec ceux que l'on avait trouvés pour les fortes concentrations, on reconnaîtra que la courbe représentant les conductances en fonction des concentrations a changé d'allure et que la quasi-proportionnalité n'existe que pour les solutions étendues.

Influence de la nature de l'électrolyte. — Faire une série de mesures de résistances avec des solutions contenant un dix-mil-

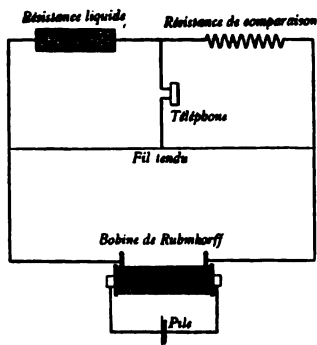
lième de leur poids de différents sels (chlorures alcalins, sulfates de zinc et de cuivre). Les conductibilités de ces solutions sont-elles du même ordre de grandeur? Les conductibilités se rapprochent-elles encore plus de l'égalité quand on les rapporte au quotient du nombre des atomes métalliques de la solution divisé par la valence de ces atomes?

— La quasi-fixité de ces nombres justifie le procédé de classification des eaux potables consistant à définir leur teneur en impuretés salines par la mesure de leur résistivité.

On déterminera donc, par les procédés précédents, la résistivité de l'eau de la ville, et l'on calculera la teneur saline équivalente, c'est-à-dire la dose de chlorure de sodium que l'on devrait ajouter à de l'eau pure pour avoir la même résistivité.

— On calculera aussi quelle serait la concentration d'une solution de chlorure de sodium dont la résistivité serait égale à celle de l'eau distillée dont on se sert.

79. Emploi du pont de Wheatstone et du téléphone. — On utilise les courants alternatifs fournis par le circuit induit d'une *petite* bobine de Ruhmkorff.



La résistance liquide est employée avec des électrodes en forme de lames qui doivent occuper toute la section de la colonne liquide.

Ces électrodes devront être faites, si possible, avec une lame de platine, que l'on a *platinée* en la chauffant au rouge après l'avoir enduite d'une solution de chlorure de platine.

On prend pour terme de comparaison une résistance métallique fixe que l'on peut préparer soi-même (VII, 71) et qui vaut 10 ohms, 100 ohms ou 1000 ohms, selon la valeur de la résistance à mesurer.

Pour rétablir l'équilibre, on fait varier le rapport des deux autres branches du pont. Il est assez commode de laisser néanmoins constante la somme de ces deux dernières résistances et les constituer toutes deux avec un seul fil de manganine ($l = 100\text{cm}$; $d = 0\text{cm}, 02$) tendu sur une planche de bois (VII, 63).

Les connexions étant établies comme l'indique le diagramme, l'expérience consiste à déplacer le contact du téléphone sur le

fil tendu jusqu'à ce que l'on obtienne dans ce téléphone le silence complet ou, du moins, un minimum de son.

Mesurer alors les deux longueurs de fil à droite et à gauche du contact mobile. Leur rapport fait connaître le rapport de la résistance liquide mesurée et de la résistance métallique de comparaison.

— Si l'on doit faire un grand nombre de ces mesures, il est commode d'avoir un appareil sur lequel on puisse lire directement le rapport cherché. Il suffit pour cela de coller sous le fil tendu une bande de papier blanc sur laquelle on inscrit les nombres 0,1; 0,2; ...; 1; 2; ...; n ; ... aux points où le rapport des deux parties du fil a précisément ces valeurs, c'est-à-dire aux distances $\frac{1}{11}l$, $\frac{2}{12}l$, ..., $\frac{l}{2}$, ..., $\frac{2}{3}l$, ..., $\frac{n}{n+1}l$, ..., comptées à partir de l'extrémité du fil, en désignant par l la longueur de ce fil.

80. Rhéostats à liquides. — Ces rhéostats sont très faciles à construire. On peut faire varier leur résistance dans d'énormes proportions en faisant varier soit la longueur de la colonne liquide, soit la concentration de l'électrolyte.

On prend comme électrolyte une solution de sulfate de cuivre, et, comme électrodes, des plaques de cuivre. La supériorité de ces rhéostats à sulfate de cuivre sur les rhéostats à liquide *acide* ou *alcalin*, tient à ce qu'ils ne donnent pas de dégagements gazeux.

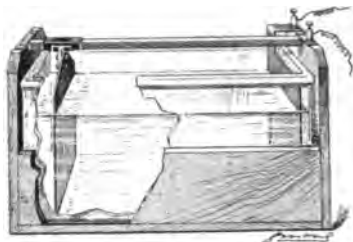
Voici leurs conditions de fonctionnement usuelles.

L'intensité du courant ne doit pas dépasser 6 ampères par décimètre carré de surface d'électrodes pour les dissolutions de sulfate de cuivre à 10 pour 100. La puissance absorbée par le rhéostat ne doit pas dépasser 10 watts par décimètre carré de surface refroidissante. Ainsi un rhéostat vertical en forme de tube ($l = 40\text{cm}$; $d = 3\text{cm}, 5$), monté comme l'indique la figure, peut supporter près de 0,5 ampère sous 80 volts. De même un rhéostat construit avec un bac pour accumulateur (35cm ; 20cm ; 15cm) peut supporter 15 ampères sous 15 volts.



La grande capacité calorifique des rhéostats à liquide leur permet d'absorber, *mais seulement pendant un temps très court*, des puissances bien plus considérables que leur puissance normale (55, 106, 110, 154 bis, 175).

— On se sert souvent, dans l'industrie, de rhéostats à liquide contenant une solution de carbonate de soude et dont les électrodes sont en fer.

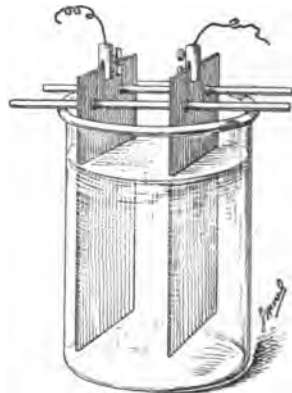


LOIS DE L'ÉLECTROLYSE.

81. Voltamètres. — Voltamètres pour dépôts métalliques.

— La solution saline peut être placée dans un vase de verre cylindrique ($V = \frac{1}{2}$ litre). On y plonge les deux électrodes constituées par des plaques du métal étudié ($5\text{cm} \times 15\text{cm}$). Si l'on veut éviter l'emploi de supports isolants spéciaux, on peut plier les angles des plaques et les accrocher au vase lui-même (VII, 67).

Il est encore assez commode de percer des trous dans le haut des plaques et de les enfiler sur des baguettes de verre reposant sur le bord du vase.



Voltamètres pour dégagements gazeux. — Courber un tube de verre ($d = 0\text{cm}, 4$) en forme de J ($15\text{cm} + 2\text{cm}$). Étirer légèrement l'extrémité de la petite branche et y souder un bout de fil de platine ($l = 2\text{cm}$, $d = 0\text{cm}, 05$) qui sera tenu par son milieu.

Après refroidissement, introduire quelques gouttes de mercure dans ce tube en J, à l'aide d'un tube effilé, et faire passer le mercure dans la petite branche en secouant un peu le tube.

On amène le courant à cette électrode par un fil de cuivre ($d = 0\text{cm}, 1$) qui pénètre par la branche ouverte et descend jusqu'au mercure.

Ayant préparé deux électrodes semblables, on les place dans un verre à expériences ($V = \frac{1}{2}$ litre) ou dans un vase cylindrique que

l'on remplit du liquide étudié. C'est, le plus souvent, de l'eau acidulée sulfurique à 30 pour 100. On renverse, dans ce verre, de

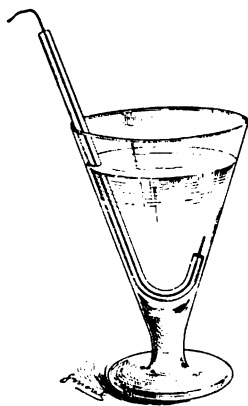


petites éprouvettes graduées ou des tubes à essais pleins d'eau acidulée dont on coiffe le platine des électrodes, et le voltamètre est prêt à fonctionner.

Ce voltamètre a une résistance de quelques ohms. Avec une force électromotrice d'une vingtaine de volts, on y peut faire passer des courants de 2 à 3 ampères et obtenir, par conséquent, une vingtaine de centimètres cubes d'hydrogène par minute (1).

— Pour l'électrolyse des solutions de soude ou de potasse, on peut se dispenser d'employer du platine. On prépare les tubes en J avec du verre de 0^{cm},6 de diamètre, et on leur donne une courbure assez faible ($R = 3^{\text{cm}}$). On peut alors faire entrer par la grande branche *un fil de fer recuit* ($d = 0^{\text{cm}},05$) qui contourne la courbure et sort par la petite branche. Ce fil de fer sert directement d'électrode, et n'a pas besoin d'être soudé au verre (95).

— Pour l'électrolyse des chlorures, on prend comme électrode positive une tige de charbon ($d = 0^{\text{cm}},5$, $l = 20^{\text{cm}}$). On la fait entrer dans un tube de



(1) Avec les fortes densités de courant, le volume d'oxygène formé est en déficit en raison de la production des peroxydes qui restent dans la dissolution et en raison de la formation d'une proportion *très sensible* d'ozone.

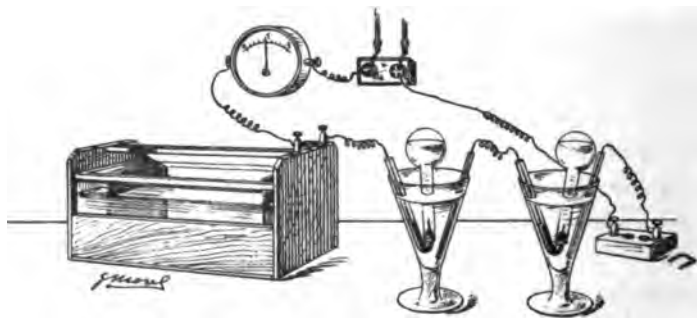
verre plus large ($d = 1^{\text{cm}}$, $l = 20^{\text{cm}}$) qui sert d'éprouvette, et l'on fait le joint à la partie supérieure avec un mastic fusible. L'extrémité supérieure du charbon a été cuivrée par électrolyse (VII, 88), et l'on y soude le fil de cuivre ($d = 0^{\text{cm}}$, 1) qui amène le courant (95).

Si l'on a soudé un tube de dégagement sur le tube de verre, il sera facile de recueillir le chlore et de le mesurer (1).

82. Lois de Faraday. — *Uniformité de l'intensité le long du circuit.* — Placer dans un même circuit deux voltamètres à eau acidulée (VII, 81) et une force électromotrice de 4 à 6 volts. Si la force électromotrice dont on dispose est plus grande, on introduit un rhéostat dans le circuit pour n'avoir qu'un courant d'environ 1 ampère.

Mesurer au bout de quelques minutes les volumes d'hydrogène dégagés dans les deux voltamètres. Ces volumes doivent être exactement les mêmes.

— On rend cette expérience très frappante en recueillant les gaz dans des petits ballons jaugés (II, 17), sur le col desquels sont



marqués des volumes égaux ($V = 50^{\text{cm}^3}$). Si l'on arrête le passage du courant juste au moment où l'un des ballons est exactement plein d'hydrogène, on constatera que l'autre ballon s'est aussi rempli dans le même temps.

Équivalents électrochimiques. — Mettre en série un voltamètre à eau acidulée (10 pour 100) à électrodes de platine et un voltamètre à soude (10 pour 100) à électrodes de fer, dans lesquels des ballons de 200^{cm^3} serviront à recueillir l'hydrogène. Mettre encore dans le même circuit un voltamètre à sulfate de cuivre

(1) Le volume de chlore recueilli est généralement en déficit par rapport au volume d'hydrogène que dégage la même quantité d'électricité. Une partie du chlore peut, en effet, rester dans la solution à l'état de chlorate et d'hypochlorite.

(10 pour 100) à électrodes de cuivre et un voltamètre à azotate d'argent (10 pour 100) à électrodes d'argent.

Envoyer dans ces voltamètres un courant d'environ 1 ampère pendant une demi-heure. Mesurer ensuite les volumes d'hydrogène en les transvasant, sur la cuve à eau, dans des éprouvettes graduées. On devra en avoir obtenu les mêmes volumes de gaz dans les voltamètres à soude et à eau acidulée.

Les électrodes de cuivre et d'argent ayant été pesées au demi-centigramme avant et après l'expérience, on constatera d'abord que le gain des électrodes négatives est égal à la perte des électrodes positives.

On reconnaîtra aussi que les masses d'argent, de cuivre et d'hydrogène obtenues sont, à quelques millièmes près, proportionnelles à leurs poids atomiques divisés par leurs valences.

83. Etalonnage d'un ampèremètre. — On met l'ampèremètre en circuit avec un voltamètre contenant une solution à 10 pour 100 de sulfate de cuivre pur ou d'azotate d'argent pur. Les électrodes doivent être assez grandes pour que la densité du courant ne dépasse pas 1 ampère par décimètre carré de surface d'électrode.

On a soin de maintenir ce courant exactement constant ou, tout au moins, de faire des lectures fréquentes de l'ampèremètre, pour que l'on puisse définir exactement la valeur moyenne de l'intensité.

On laisse passer le courant pendant un temps suffisant pour que l'augmentation de poids de l'électrode négative puisse être déterminée au millième près avec la balance dont on dispose. L'intensité qui correspond à l'indication de l'ampèremètre est alors déterminée en valeur absolue à un millième près.

84. Variations de concentration au voisinage des électrodes. — Remplir une éprouvette à pied ($V = 500\text{cm}^3$) avec une solution à 1 pour 100 de sulfate de cuivre et se servir comme électrodes de deux lames de cuivre horizontales occupant toute la largeur de l'éprouvette et soudées à des fils de cuivre. Le fil qui conduit à l'électrode inférieure est isolé par un tube de verre.

Prendre l'électrode supérieure comme électrode négative et envoyer dans la colonne liquide un courant de quelques centièmes d'ampère, ce qui peut nécessiter une cinquantaine de volts.

Si l'on maintient ce courant pendant une demi-heure, on



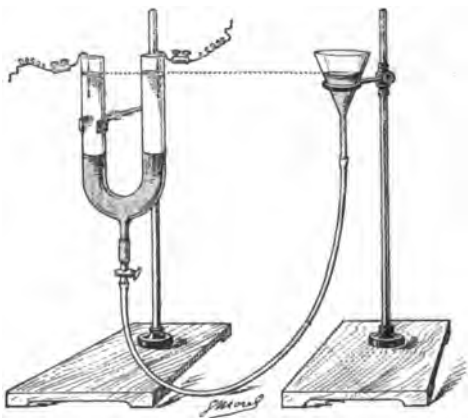
observe une décoloration presque complète de la solution de sulfate de cuivre au voisinage du pôle négatif (15 bis, 82 bis).

85. Mobilité des ions. — *Montage.* — Se procurer un tube en U ($h = 20^{\text{cm}}$, $d = 1^{\text{cm}}$, 5) prolongé par un tube plus étroit soudé sur la courbure. Adapter un robinet de verre à ce tube et le relier à un petit entonnoir au moyen d'un tube de caoutchouc (*feuille anglaise*; $d = 0^{\text{cm}}$, 8; $l = 60^{\text{cm}}$). Fixer les deux parties de l'appareil sur des supports à pinces de hauteur réglable.

Fermer le robinet de communication et remplir l'entonnoir avec une solution *rose foncé* de permanganate de potassium.

Ouvrir le robinet pendant un instant et laisser passer quelques gouttes de liquide dans le tube en U, afin d'être sûr que le tube de caoutchouc ne contient plus de bulles d'air.

Retirer le tube en U, le rincer à l'eau, mettre un tampon lâche de coton *hydrophile* dans la tubulure inférieure et remettre l'appar-



reil en place. Prendre ensuite de l'eau très légèrement acidulée par quelques gouttes seulement d'acide sulfurique et en verser dans le tube en U une quantité telle que les grandes branches soient à moitié pleines.

Régler la hauteur des supports de façon que le niveau du permanganate soit un peu plus haut que celui de l'eau acidulée et ouvrir doucement le robinet de communication. Le permanganate monte dans le tube en U sans se mélanger à l'eau acidulée et arrive bientôt à mi-hauteur des grandes branches : on ferme alors le robinet.

Expérience. — Plonger des fils ou des lames de platine à la partie

supérieure de l'eau acidulée et envoyer à travers le tube en U un courant de quelques dixièmes d'ampère, ce qui peut nécessiter une cinquantaine de volts.

En quelques minutes, on voit se produire un déplacement des surfaces de séparation de l'eau acidulée et du permanganate. Les ions colorés, MnO^1 reculent vers le pôle positif et c'est dans ce sens que se déplace la surface de séparation des deux liquides (15 bis, 82 bis).

GALVANOPLASTIE.

86. Moulage. — Le plus simple est de couler sur la surface huilée de l'objet une pâte fluide faite de plâtre à modeler et d'eau. Lorsque le plâtre a fait prise, on rend sa surface imperméable en le trempant un moment dans de la cire ou de la stéarine fondue.

— On prend aussi de très bons moules avec de la gutta-percha ramollie dans de l'eau presque bouillante et pressée sous l'eau chaude contre la surface de l'objet. — On peut encore prendre des empreintes avec un alliage facilement fusible (I, 51).

Métallisation. — On rend conductrice la surface d'un moule en plâtre ou en gutta en y appliquant de la plombagine en poudre (mine de plomb) au moyen d'un bon pinceau (poils de chameau, $l = 1\text{ cm}$).

— On peut métalliser la surface des objets les plus fragiles en y déposant d'abord, avec un pulvérisateur, une couche légère d'une solution d'azotate d'argent. On réduit ensuite cette solution saline par un courant d'hydrogène phosphoré gazeux pur ou, du moins, exempt de vapeurs de phosphore liquide (126, 207).

87. Décapage des objets métalliques. — Nous ajouterons quelques détails aux indications générales qui ont déjà été données (I, 76).

Décapage électrolytique. — Les métaux peuvent être décapés par électrolyse en les plongeant dans une solution de sulfate de sodium à 20 pour 100. On se sert d'une électrode auxiliaire en charbon. On prend d'abord l'objet comme pôle négatif pour le dégraissage; puis on le prend comme pôle positif pour le décapage proprement dit. Il suffit pour ces décapages d'une force électromotrice de 4 volts.

Décapage pour dorure ou nickelage. — Les objets en argent

ou en laiton sont polis au tripoli ou au blanc d'Espagne et frottés avec une peau de chamois (1). On peut encore améliorer le poli au moyen de *brunissoirs* ou de brosses *métalliques* très douces.

On dégraisse ensuite par ébullition dans une solution de soude, puis dans une solution de cyanure de potassium; on lave abondamment et l'on porte immédiatement dans le bain galvanoplastique (177, 207).

88. Dépôts galvaniques. — On prend comme électrode positive une plaque du métal que l'on veut déposer. — Pour avoir un dépôt compact et adhérent, la densité de courant ne doit guère dépasser 1 ampère par décimètre carré de surface d'électrode. — Il y a grand avantage à agiter constamment le bain : si l'objet est de révolution, on le fera tourner sur lui-même sans interruption. — On améliore les dépôts en les brossant de temps en temps *sous l'eau* avec une brosse métallique.

L'électrolyse se fait en général vers 15° ou 20°.

Argenture. — Prendre un bain contenant :

Eau	1000 ^g
Cyanure double d'argent et de potassium <i>pur</i>	100
Cyanure de potassium <i>pur</i>	20

— Cette même solution peut donner sans électrolyse d'assez bons dépôts d'argent sur le cuivre et le laiton, surtout si l'on ajoute un plus grand excès de cyanure de potassium et si l'on opère à l'ébullition.

— On obtient aussi de bons dépôts électrolytiques avec une solution à 10 pour 100 d'azotate d'argent pur et exactement neutre (207).

Cuivrage en bain acide. — Ce procédé de cuivrage sert pour obtenir un dépôt galvanique sur cuivre ou sur plombagine. On se sert du bain suivant :

Eau	1000 ^g
Sulfate de cuivre cristallisé.....	400
Acide sulfurique	20

Dès que le dépôt métallique est obtenu, on le lave avec de l'eau contenant une trace d'acide sulfurique, puis on rince avec de l'eau distillée que l'on éponge avec du papier buvard, et l'on achève le

(1) On trouve dans le commerce des étoffes de soie imprégnées de *rouge d'Angleterre*, avec lesquelles on polit facilement les objets métalliques.

séchage par l'action d'une chaleur douce. Ces précautions ont pour objet d'éviter l'oxydation du métal.

Cuivrage en bain alcalin. — Ce bain sert à obtenir des dépôts de cuivre sur le fer, le zinc, le plomb et les objets en laiton soudés à l'étain. On s'en sert souvent pour cuivrer ces objets avant de les dorer, de les argenter ou de les nickeler.

On prépare d'abord la solution :

Eau.....	1500 ^g
Cyanure de potassium commercial	50 ^g
Bisulfite de sodium	30 ^g

On dissout, d'autre part, 35^g d'acétate cuprique dans 1000^g d'eau, on y ajoute 20^{cm³} d'ammoniaque, puis on y verse toute la solution précédente.

L'électrolyse se fait vers 50° C. (207).

Dorure. — Seuls, l'argent et le cuivre supportent bien la dorure directe. En général, on commence par cuivrer les objets que l'on veut dorer.

Le bain de dorure se prépare à partir de l'or métallique. On fait une dissolution à 15 pour 100 de cyanure de potassium *pur*. On y plonge deux plaques électrodes *d'or pur*, la cathode quatre fois plus petite que l'anode et l'on électrolyse avec un courant intense atteignant 10 ampères par décimètre carré de cathode. On a soin d'envelopper l'anode avec du papier filtre pour éviter de perdre l'or peu adhérent qui s'y dépose.

De l'or se dissout progressivement pendant cette électrolyse. On reconnaît que la concentration est suffisante à ce qu'une lame de platine prise pour cathode se recouvre d'un bon dépôt d'or.

— La dorure galvanique est un mode de protection des métaux bien supérieur à l'application d'un vernis à la gomme laque et *ne coûte pas plus cher*. Le seul inconvénient est la *petite* mise de fonds nécessaire pour établir le bain et l'électrode négative (207).

Nickelage. — Préparer deux solutions contenant :

Eau.....	2000 ^g	Eau.....	2000 ^g
Tartrate d'ammonium ..	150	Sulfate de nickel pur....	200
Tanin.....	1		

Neutraliser exactement la seconde solution avec de l'ammoniaque; mêler ensuite les deux solutions et filtrer vers la température de 40° C.

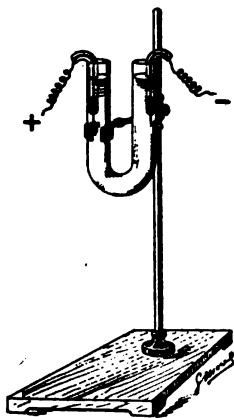
A., II.

En général, les objets à nickeler devront être préalablement cuivrés (177, 207).

RÉACTIONS SECONDAIRES DANS L'ÉLECTROLYSE.

89. Décomposition d'un sulfate alcalin. — Préparer une décoction de fleurs de mauves ou de violettes. Verser dans un tube en U une solution à 10 pour 100 de sulfate de sodium colorée avec cette décoction.

Électrolyser la solution en prenant pour électrodes des lames ou des fils de platine. Ces fils pourront n'avoir que quelques centimètres de longueur sur 0^{cm}, 05 de diamètre. Ils pourront même être pris encore plus courts si on les soude à l'extrémité d'un tube de verre ($d = 0^{\text{cm}}, 3$) pour les relier par quelques gouttes de mercure avec les fils de cuivre qui amènent le courant.



En employant une force électromotrice de plusieurs volts, on forme en quelques instants, aux deux pôles, des quantités d'acide et de base suffisantes pour donner les colorations rouge et verte caractéristiques.

Ces colorations disparaissent en mélangeant les liquides des deux pôles, puisque l'acide et la base se sont produits en quantités équivalentes.

90. Indicateurs de pôles. — Préparer un papier réactif humecté avec une solution de sulfate de sodium additionnée de *phénolphtaléine*. En touchant le papier humide avec les deux électrodes, l'électrode négative s'entoure immédiatement d'une auréole rouge violacé.

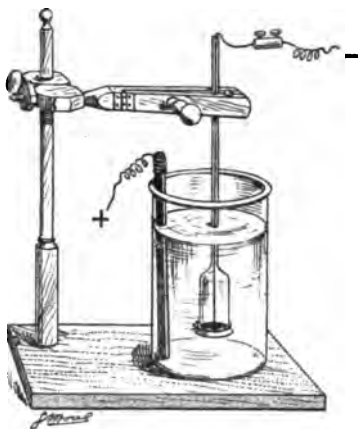
— On peut aussi se servir d'un papier réactif au tournesol *neutre* humecté avec de l'eau ordinaire; il rougit au pôle positif et bleuit au pôle négatif. — L'expérience est plus visible avec un papier au tournesol-rouge, mais on n'y voit naturellement que la trace bleue du pôle négatif.

— Un papier au ferrocyanure de potassium touché avec des électrodes de fer donne une tache bleue au pôle positif. Avec un courant alternatif, si l'on déplace l'une des électrodes le long de ce

papier réactif, les changements de sens de la différence de potentiel se traduisent sur la trace de l'électrode mobile par des changements de couleurs qui permettent de compter les alternances.

91. Production des amalgames alcalins. — Fermer l'ouverture d'un tube à entonnoir au moyen d'une membrane de papier parchemin mouillée. Mettre un peu de mercure au fond du tube et y faire pénétrer un fil de fer qu'on reliera au pôle négatif du circuit.

Soutenir cette électrode à l'intérieur d'un vase de verre ($V = 500\text{cm}^3$) contenant une solution concentrée de chlorure de sodium. Mettre enfin dans cette solution un crayon de charbon à lumière muni d'un fil de cuivre qu'on reliera au pôle positif du circuit.



Une dizaine de volts aux bornes de cet appareil suffisent pour obtenir en quelques minutes une quantité sensible d'amalgame.

Pour montrer la production de l'amalgame, il n'y a qu'à vider le mercure dans de l'eau distillée; on constatera un dégagement gazeux et la liqueur prendra une réaction alcaline (95).

Amalgame d'ammonium. — Dans le cas de l'ammonium, il n'est pas nécessaire de protéger le mercure par une membrane de parchemin. On peut mettre un peu de mercure dans un verre à expériences et verser au-dessus une solution concentrée de chlorure d'ammonium. On emploie comme électrode positive une tige de charbon suspendue dans la solution et l'on reprend le courant dans le mercure, au moyen d'un fil de fer plongeant dans ce mercure et protégé du contact de la solution par un tube de verre.

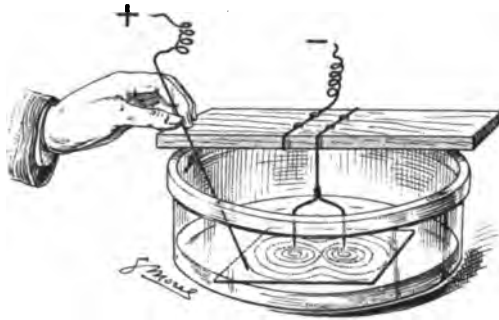


Après quelques instants de passage d'un courant de 1 ampère,

le mercure s'est fortement boursoufflé, il a pris une consistance pâteuse : il s'est formé de l'amalgame d'ammonium.

92. Figuration électrochimique des lignes équipotentiellles (*Guebard*). — Découper une lame de laiton (10^{cm} ; 10^{cm} ; 0^{cm} , 05), la décaper, puis la polir au tripoli. Rincer et essuyer cette lame en ayant soin de ne pas poser les doigts sur sa surface et la mettre au fond d'une assiette creuse ou d'un cristallisoir. Verser au-dessus du métal une hauteur de 1^{cm} environ d'une solution d'acétate de plomb.

Disposer au-dessus de la plaque une électrode en forme de fourche faite de deux fils de cuivre, dont les pointes, écartées de 3^{cm} ,



affleurent la surface du bain. Relier cette électrode au pôle négatif d'une batterie de piles de quelques volts et toucher la plaque de métal avec un fil métallique communiquant avec le pôle positif. Au bout de quelques secondes, il se dépose sur la lame de laiton une couche de peroxyde de plomb qui, examinée par miroitement, montre des anneaux colorés.

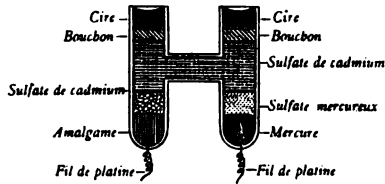
Ces anneaux colorés ont une forme qui reproduit presque exactement celle des lignes équipotentiellles qui auraient pour pôles les projections des électrodes négatives sur le plan de la plaque.

— Si l'on ne prend qu'une seule pointe comme électrode négative, on obtient des anneaux colorés de forme circulaire.

PILES ET ACCUMULATEURS.

93. Piles étalons. — *Étalon au cadmium.* — C'est la meilleure des piles étalons. Le montage peut être effectué suivant les indications de la figure, dans des tubes de 1^{cm} de diamètre.

Le fil de platine, négatif, est recouvert d'amalgame de cadmium à 10 pour 100 sur lequel on met une couche de cristaux de sulfate de cadmium pur et neutre. Au-dessus du mercure



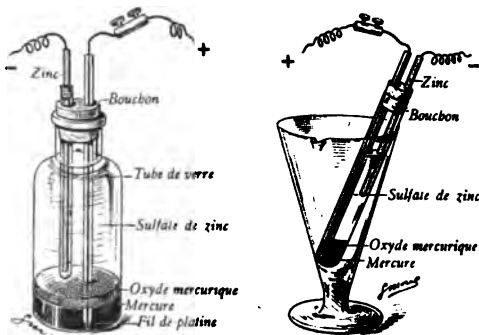
de l'autre pôle, on met une pâte faite avec du sulfate mercurieux pur et lavé que l'on a mêlé avec une solution saturée de sulfate de cadmium.

Le tube en II est ensuite rempli avec la solution saturée de sulfate de cadmium, puis il est fermé et scellé.

Cet étalon est constant à peu près au dix-millième et ne doit débiter que des courants inférieurs au dix-millième d'ampère.

Étalon Gouy. — Le pôle positif est du mercure recouvert d'un peu d'oxyde mercurique jaune (préparé par l'action de la potasse sur le chlorure mercurique). Au-dessus est une solution de sulfate de zinc pur (densité = 1,06). Le pôle négatif est un crayon de zinc pur amalgamé.

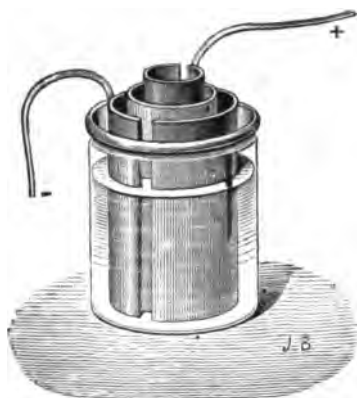
Le montage peut se faire de bien des manières, par exemple



dans un tube à essais ou dans un flacon. Si l'on veut que l'élément se conserve longtemps, il convient de placer le zinc dans un tube de verre qui ne communique avec le liquide ambiant que par un petit trou, afin que le mercure ne puisse pas se charger d'amalgame de zinc, ce qui modifierait la valeur de la force électromotrice.

Cet étalon est constant à peu près au millième et ne doit fournir que des courants inférieurs au milliampère.

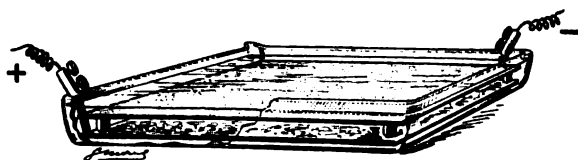
Étalon Daniell. — On monte la pile avec un vase poreux pour séparer les deux solutions. Ce sont respectivement des solutions de sulfate de zinc et de sulfate de cuivre *purs* ayant toutes deux une densité de 1,1. On plonge dans le sulfate de cuivre une électrode de cuivre rouge, lame ou tige, et dans le sulfate de zinc une électrode qui peut n'être qu'un bâton de zinc *pur* amalgamé.



Le vase poreux doit être rempli de liquide à la hauteur voulue quelque temps à l'avance. Le liquide filtre à travers les parois, il chasse l'air qui y était contenu et l'on peut alors monter la pile sans craindre une trop grande résistance intérieure (176).

Cet étalon est constant à peu près au centième et peut fournir des courants dépassant le milliampère sans que sa force électromotrice baisse sensiblement.

94. Pile économique à grand débit. — Au fond d'une cuvette photographique ($13^{\text{cm}} \times 18^{\text{cm}}$), on dispose une lame de cuivre soudée à un conducteur émergent. On protège ce conduc-



teur contre le contact du liquide au moyen d'un bout de tube de verre et l'on saupoudre la lame de cuivre avec environ 50^{g} de sulfate de cuivre bien concassé.

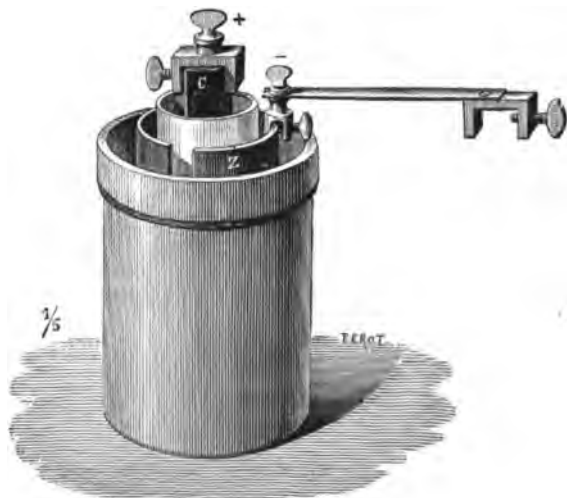
L'autre électrode est une lame de zinc ($13^{\text{cm}} \times 18^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}},1$) soudée aussi à un fil conducteur. Les deux plaques métalliques sont maintenues à une distance d'environ 1^{cm} par quatre cales de bois qui auront pu être mastiquées dans les angles de la plaque de cuivre.

On remplit la cuvette avec une solution saturée de chlorure d'ammonium et la pile est prête à fonctionner. Sa force électromotrice est voisine de 0,9 volt et elle peut fournir jusqu'à 15 ampères.

Cette pile ne doit être montée qu'au moment de s'en servir et l'on ne doit plus la remuer dès qu'on y a versé le liquide excita-
teur. Après les expériences, on peut jeter le liquide qui n'a pas grande valeur (47, 145).

95. Pile Bunsen et pile au bichromate. — Dans le vase poreux, on met une électrode de charbon plongeant soit dans de l'acide azotique concentré, soit dans la solution suivante :

Eau	400 ^g
Acide sulfurique.....	100
Bichromate de potassium.....	50



Dans le vase extérieur, on met du zinc amalgamé plongeant dans de l'eau acidulée sulfurique au dixième.

Si la pile a été préparée avec de l'acide azotique, il faut la démonter aussitôt qu'on a fini de s'en servir. Avec le dépolarisant au bichromate, au contraire, la pile peut rester montée plusieurs jours sans trop s'altérer.

96. Piles Leclanché. — Les piles Leclanché se trouvent à très bon compte dans le commerce.

Le charbon positif est entouré de bioxyde de manganèse ; le

liquide excitateur est une solution presque saturée de chlorure d'ammonium.

Ces piles conviennent particulièrement bien pour le service des sonneries. Avec les appareils courants et pour les distances que l'on a d'ordinaire dans les appartements, il convient d'employer en tension trois éléments de taille moyenne.

Si l'on a soin d'enfermer les éléments dans une boîte bien



close et de les placer dans un endroit frais, leur entretien est insignifiant; on n'a besoin, pendant des années, que d'y mettre un peu d'eau tous les ans.

— Pour éviter le *grimpement des sels* le long des parois des vases de verre, on enduit le haut des vases avec une pâte préparée en incorporant à chaud de la vaseline dans un poids égal de paraffine (177).

97. Accumulateurs. — Les meilleurs accumulateurs à poste fixe sont les accumulateurs *type Planté*, dont les électrodes sont simplement en plomb. Ils peuvent fournir plus de 600 décharges complètes sans altération.

Ils sont plus lourds, mais beaucoup plus robustes que les accumulateurs à oxydes rapportés dont la vie est d'autant plus courte qu'ils sont plus légers.

Une batterie d'accumulateurs ne doit jamais être déchargée à fond. On doit toujours la recharger dès que la force électromotrice est descendue à 1,9 volt par élément. Si la batterie ne doit pas servir pendant quelque temps (périodes de vacances), il faut la charger complètement et même lui donner une forte surcharge.

Les accumulateurs doivent être visités de temps à autre, au moins une fois par mois. On passe une baguette de bois entre les plaques pour faire tomber les poussières et l'on mesure indivi-

duellement la force électromotrice de chacun des éléments. Il faut démonter et réparer tout élément dont la force électromotrice ne dépasserait pas 2 volts après la charge.

98. Formation d'un accumulateur. — *Montage.* — Découper à la cisaille trois lames de plomb (10^{cm} ; 7^{cm} ; $0^{\text{cm}}, 1$) en leur laissant des prolongements (3^{cm} ; 1^{cm}) sur lesquels on soude des fils de cuivre (fils de sonnerie $d = 0^{\text{cm}}, 09$).

Disposer les trois lames comme l'indique la figure, en les séparant par deux tiges de verre ($2l = 25^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 5$), que l'on a



courbées dans la flamme en leur donnant la forme d'un U dont les deux branches ne sont séparées que par un intervalle d'un peu plus de 1^{mm} . Attacher enfin ces lames avec deux bracelets de caoutchouc (35).

Pour achever de monter l'accumulateur, il n'y a plus qu'à mettre l'ensemble des électrodes dans un vase de verre ($V = 500^{\text{cm}^3}$) contenant de l'eau additionnée du tiers de son poids d'acide sulfurique. :

La lame intérieure sera l'électrode positive et les lames extérieures que l'on aura pu souder ensemble formeront l'électrode négative.

Expériences. — Mettre un voltmètre (de 0 à 3 volts) en dérivation sur les pôles de l'accumulateur et envoyer dans l'appareil un courant d'environ 1 ampère. On pourra demander ce courant à deux accumulateurs montés en tension et prendre comme rhéostat un fil de maillechort ou même un fil de fer ($d = 0^{\text{cm}}, 015$; $l = 150^{\text{cm}}$), enroulé sur un bout de bois. Pendant le passage du courant, on voit la lame positive se couvrir de peroxyde de plomb et la teinte des lames négatives devenir plus claire. En même temps le voltmètre indique dans l'accumulateur une force électromotrice qui dépasse 3 volts.

Arrêter le courant après quelques minutes d'électrolyse. La force électromotrice indiquée par le voltmètre tombe à 2,6 volts, puis elle descend très rapidement vers 2,1 volts où elle se maintient.

Décharger l'accumulateur dans un ampèremètre à travers le fil de maillechort de tout à l'heure, de manière à avoir encore un courant de l'ordre de 1 ampère et mesurer la durée de la décharge. On pourra se dispenser de mettre un ampèremètre dans le circuit si l'on a mesuré la résistance du fil de maillechort et si l'on suit les variations de force électromotrice indiquées par le voltmètre.

Quelle est la *capacité* de l'accumulateur? La force électromotrice de l'élément se maintient-elle constante pendant la décharge?

— Charger de nouveau l'accumulateur pendant quelques minutes puis le décharger et lui faire subir une succession de décharges. La capacité mesurée à la décharge n'augmente pas au nombre de décharges, mais elle est la même pour les dimensions indiquées.

close et de les placer dans un endroit t.

gnifiant; on n'a besoin, pendant des années, puis revenir au peu d'eau tous les ans. ventilation appréciable

— Pour éviter le *grimpement des sels* le l vases de verre, on enduit le haut des vases avec une couche d'eau acidulée, en incorporant à chaud de la vaseline dans un poids obtenu en faisant fondre la vaseline dans le litharge. En

97. Accumulateurs. — Les meilleurs accumulateurs sont ceux qui ont une charge positive un dépôt fixe sont les accumulateurs *type Planté*, dont les électrodes sont constituées simplement en plomb. Ils peuvent fournir plus de 600 décharges complètes sans altération.

Ils sont plus lourds, mais beaucoup plus robustes que les accumulateurs à oxydes rapportés dont la vie est d'autant plus courte qu'ils sont plus légers.

Une batterie d'accumulateurs ne doit jamais être déchargée à fond. On doit toujours la recharger dès que la force électromotrice est descendue à 1,9 volt par élément. Si la batterie ne doit pas servir pendant quelque temps (périodes de vacances), il faut la charger complètement et même lui donner une forte surcharge.

Les accumulateurs doivent être visités de temps à autre, au moins une fois par mois. On passe une baguette de bois entre les plaques pour faire tomber les poussières et l'on mesure indivi-

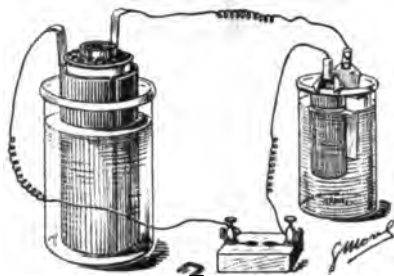
ÉLECTROLYSE ET POLARISATION.

99. — Phénomènes normaux d'électrolyse dans les piles. — *Pile Daniell.* — Monter une pile Daniell à vase poreux en employant une lame de cuivre et une lame de zinc amalgamé plongeant dans du sulfate de zinc.

On aura déterminé tout d'abord le poids des électrodes avant de les mettre dans leurs vases respectifs.

Fermer le circuit de la pile sur un voltamètre à sulfate de cuivre (**VII, 67**) et laisser passer le courant pendant un quart d'heure.

Démonter les électrodes de la pile et du voltamètre, les laver,



les sécher et les peser. Si le dépôt, dans la pile, est cristallin, on le séchera en le trempant un instant dans de l'alcool, puis en laissant évaporer l'alcool.

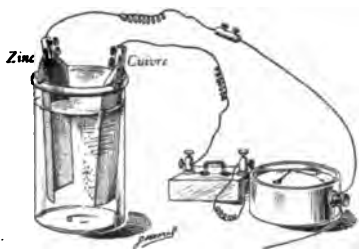
A-t-on obtenu, dans la pile, un dépôt de cuivre égal à celui qui a été obtenu dans le voltamètre? La perte de poids du zinc est-elle égale au poids du dépôt de cuivre multiplié par le rapport des poids atomiques?

— Pour une expérience de cours, si l'on veut mettre en évidence le dépôt de cuivre dans la pile Daniell, on prend pour pôle positif une lame de platine ou une baguette de charbon sur laquelle le dépôt de cuivre est très visible (66).

100. — Électrolyse dans la pile zinc-eau acidulée-cuivre. — Placer une lame de cuivre et une lame de zinc pur amalgamé (15cm ; 5cm ; 0cm , 1) dans un vase ($V = 500\text{cm}^3$) contenant de l'eau acidulée sulfurique. Il est commode de clouer ces deux lames de part et d'autre d'une baguette de bois (10cm ; 2cm ; 2cm) qu'on pose sur les bords du vase.

Il n'y a pas d'attaque du zinc ni de dégagement d'hydrogène; par conséquent il ne se forme pas de sulfate de zinc.

Pour s'en assurer, on fait une prise d'essai de quelques centimètres cubes, et l'on y ajoute progressivement une solution de potasse, jusqu'à obtenir la neutralisation, que l'on constate au moyen d'un papier de tournesol. Une fois la neutralité atteinte, une petite quantité de potasse ne doit pas donner de précipité blanc. Il faut faire attention à ne pas verser brus-



quement une forte dose de potasse, puisque l'oxyde de zinc est soluble dans un excès d'alcali.

Ceci fait, réunir les lames métalliques par un circuit contenant un ampèremètre et un rhéostat qui pourra n'être qu'un fil de fer de longueur variable ($d = 0^{\text{cm}}, 025$; $l = 100^{\text{cm}}$).

Dès que le contact est établi, on voit des bulles d'hydrogène se dégager *sur le cuivre*, et la rapidité de ce dégagement augmente quand on augmente l'intensité du courant, c'est-à-dire quand on diminue la résistance du circuit.

On obtient le dégagement le plus rapide en mettant les deux lames en court-circuit sur l'ampèremètre. On augmente encore la rapidité du dégagement gazeux en rapprochant les deux lames de manière à diminuer la résistance intérieure de la pile.

Ces observations faites, on fait dans la liqueur une nouvelle prise d'essai sur laquelle on met en évidence l'existence du sulfate de zinc dissous.

101. — Polarisation de la pile zinc-eau acidulée-cuivre.
 — *Montage.* Couper deux lames de cuivre (15^{cm} ; 3^{cm} ; $0^{\text{cm}}, 1$) et deux lames de zinc de mêmes dimensions, auxquelles on soude des fils de cuivre ($d = 0^{\text{cm}}, 05$; $l = 10^{\text{cm}}$). Nettoyer les lames de cuivre au papier émeri; amalgamer les lames de zinc (**I, 54**), puis clouer ces 4 lames contre les faces d'une plaque de bois carrée (6^{cm} ; 6^{cm} ; 2^{cm}). Plonger cet ensemble de 4 électrodes dans un vase de verre cylindrique ($V = 500^{\text{cm}^3}$), contenant de l'eau additionnée du tiers de son poids d'acide sulfurique, la plaque de bois reposant sur les bords du vase.

Préparer en outre un rhéostat d'une dizaine d'ohms fait, par

exemple, d'un fil de manganine fin ($d = 0^{\text{cm}},02$; $l = 100^{\text{cm}}$) tendu sur une planche de bois.

Expérience. — Prendre un voltmètre de 0 à 3 volts assez résistant ($R \geq 100$ ohms) et mesurer la force électromotrice des 4 couples zinc-cuivre que l'on peut former avec les deux lames de zinc et les deux lames de cuivre. Ces forces électromotrices sont exactement égales et voisines de 1 volt.

Laisser le voltmètre en communication permanente avec une paire de lames et mettre, d'autre part, le rhéostat dans le circuit de ce couple.

La résistance intérieure de la pile n'étant que d'une fraction d'ohm, et le courant total étant de l'ordre d'un dixième d'ampère, la chute de potentiel dans l'électrolyte de la pile ne peut être que de l'ordre du centième de volt (**VII, 103**). On voit cependant l'indication du voltmètre baisser rapidement d'environ un demi-volt.

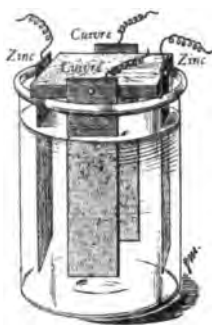
Cette baisse de voltage se dissipe bientôt si l'on coupe le courant et reparait lorsque le courant est de nouveau rétabli depuis un moment.

Pour localiser l'origine principale de cette *polarisation*, on mesurera de nouveau les forces électromotrices des quatre combinaisons de lames zinc et cuivre, prises deux à deux, tout en continuant à laisser passer le courant. Les valeurs que l'on trouve pour ces forces électromotrices permettent de conclure que la *polarisation* a son siège sur la lame de cuivre du couple en activité.

On notera, en particulier, qu'il n'existe aucune force électromotrice entre les deux lames de zinc, mais qu'il y a une force électromotrice d'environ un demi-volt entre les deux lames de cuivre.

Laissant enfin le voltmètre en relation avec les deux lames de cuivre, on interrompt le courant principal et l'on constate que pendant un certain temps les deux lames de cuivre continuent à présenter cette même différence de potentiel de un demi-volt. On a ainsi constitué une pile *cuivre, eau acidulée, cuivre polarisé*, dans laquelle ce dernier métal forme le pôle négatif. Cette pile est analogue à un accumulateur.

— On pourra encore constater que la polarisation disparaît si



l'on nettoie la surface du cuivre polarisé en la frottant avec du papier de verre (176).

102. — Polarisation d'une pile ou d'un accumulateur.

— On étudiera comme nous venons de le dire, non seulement un élément Volta, mais encore une pile Leclanché, une pile Daniell et un accumulateur. En mettant dans le circuit de l'élément étudié des résistances de plus en plus faibles, en même temps que l'on mesure la force électromotrice, on constatera que ces éléments se classent dans l'ordre où nous les avons écrits, au point de vue de l'intensité maxima des courants qu'ils peuvent fournir sans polarisation sensible (1).

Si l'on a soin que les résistances mises en circuit soient connues, la mesure de la force électromotrice fera aussi connaître l'intensité du courant fourni par la pile.

On construira alors la courbe représentant les variations de l'intensité, ou plutôt de l'*inverse de l'intensité* en fonction de la résistance extérieure.

La courbe obtenue peut être grossièrement rectiligne. En la prolongeant jusqu'à l'axe des résistances on pourra se faire une idée de la résistance intérieure de la pile.

— On construira encore la courbe donnant la puissance utilisée à l'extérieur de la pile en fonction de l'intensité qu'on lui fait débiter. On construira aussi la courbe représentant la décroissance progressive de l'intensité ou de la puissance quand on épuise la pile en la laissant fermée en permanence sur une résistance assez faible.

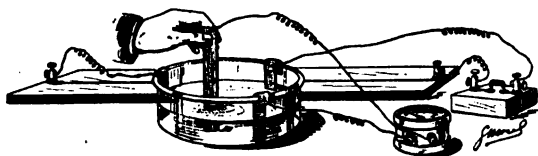
— On construit d'une façon plus correcte la courbe de polarisation d'un élément en employant une méthode d'opposition (VII, 64); ou encore en prenant comme voltmètre un galvanomètre étalonné mis en dérivation sur une résistance connue qui fait elle-même partie d'un circuit *très résistant* alimenté par l'élément étudié.

(1) Un accumulateur peut *presque* être considéré comme une pile impolarisable sans résistance intérieure, dont la force électromotrice est de 2 volts. On réalise à *peu près* une intensité de courant dont la valeur est donnée à l'avance en introduisant dans le circuit d'un accumulateur la résistance calculée correspondante. Inversement on détermine à *peu près* la valeur d'une résistance en la mettant dans le circuit d'un accumulateur et en mesurant l'intensité du courant obtenu.

103. — Chute de potentiel dans une pile en raison des résistances intérieures. — *Montage.* — Préparer une lame de cuivre et une lame de zinc amalgamé (15^{cm} ; 5^{cm} ; $0^{\text{cm}},5$) auxquelles on soude des fils de cuivre (fils de sonnerie $d = 0^{\text{cm}},09$) et plier ces lames de manière à pouvoir les accrocher sur les bords d'un cristallisoir ($d = 25^{\text{cm}}$). Fixer les lames de zinc et de cuivre en deux points diamétralement opposés du cristallisoir, et remplir ce vase avec de l'eau acidulée sulfurique.

Préparer encore deux électrodes auxiliaires en zinc amalgamé (10^{cm} ; 1^{cm} ; $0^{\text{cm}},05$).

Prendre enfin un voltmètre de 0 à 3 volts de grande résistance ($R \geq 100$ ohms), et qui soit assez sensible pour qu'on puisse lire



au moins les vingtièmes de volt (¹). Relier les bornes de ce voltmètre aux deux électrodes auxiliaires.

Expériences. — Plonger les deux électrodes auxiliaires en zinc amalgamé en deux points quelconques de l'eau acidulée contenue dans le cristallisoir. Le voltmètre n'indique aucune différence de potentiel entre ces électrodes tant que la pile zinc-cuivre formée par les électrodes fixes reste en circuit ouvert.

Fermer maintenant la pile zinc-cuivre sur une résistance fixe, d'une dizaine d'ohms (fil de manganine $l = 100^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}},02$) et plonger verticalement les électrodes exploratrices dans l'eau acidulée. On observe alors une différence de potentiel entre les deux électrodes.

Laisser fixe l'une des électrodes exploratrices et déplacer l'autre dans le cristallisoir. La différence de potentiel varie; elle s'annule et change de signe pour certaines positions de l'électrode mobile. Elle croît en valeur absolue quand cette électrode mobile se rapproche des pôles de la pile.

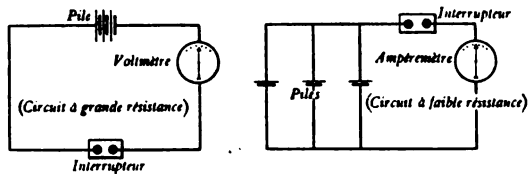
(¹) On peut prendre comme voltmètre un circuit contenant une résistance d'un millier d'ohms et un *galvanomètre* quelconque. Si le galvanomètre est encore trop sensible, on met une résistance convenable en dérivation entre ses bornes.

Pour une position donnée de l'électrode exploratrice qu'on laisse fixe, chercher les positions de l'autre électrode pour lesquelles la différence de potentiel disparaît. Reporter sur un diagramme le lieu de ces positions : c'est une ligne équipotentielle.

On prendra deux ou trois positions de l'électrode fixe, et l'on tracera la ligne équipotentielle correspondant à chacune de ces positions. On reconnaîtra que ces lignes coupent normalement le contour du cristalliseur et qu'elles présentent les mêmes formes que les lignes équipotentielles que l'on a tracées dans une *nappe de courant* (VII, 65). On pourra produire une *coupure* dans cette nappe en plongeant verticalement une lame de verre dans le cristalliseur.

104. Couplage des piles. — Préparer trois piles zinc-cuivre (VII, 100) faites avec de l'eau acidulée étendue (2 pour 100) pour que leur résistance intérieure soit appréciable. Mesurer le courant que chacune d'elles peut donner dans un circuit extérieur très peu résistant tel qu'un simple ampèremètre.

Monter ensuite les trois piles *en série* et les mettre encore en court-circuit sur l'ampèremètre. On constate que le courant n'est



pas sensiblement augmenté. Le courant serait, au contraire, à peu près triplé si l'on montait les piles *en surface*.

— Si l'on ferme ensuite les piles sur un circuit extérieur assez résistant, tel qu'un voltmètre (de 0 à 3 volts $R \geq 100$ ohms), ce sera le montage *en série* qui donnera le courant maximum. Les trois piles montées *en surface* ne donneraient, maintenant, guère plus de courant qu'une seule d'entre elles.

105. Polarisation d'un voltmètre à eau acidulée. — *Électrodes attaquables.* — Prendre le même rhéostat et le même appareil à quatre lames de cuivre et de zinc amalgamé que pour les expériences du § 103.

Mettre dans le circuit une pile auxiliaire ayant une force électromotrice d'au moins 2 volts (un accumulateur) et électrolyser

l'eau acidulée avec un courant de l'ordre du dixième d'ampère, en se servant des deux électrodes de cuivre.

Ayant mis le voltmètre en dérivation sur les deux électrodes de cuivre, on constate qu'au bout de très peu de temps, ces électrodes présentent une différence de potentiel de près de 1 volt. Cette différence de potentiel persiste encore quelques instants après que l'on a arrêté le passage du courant.

Rétablissant le courant, et mesurant au voltmètre les différences de potentiel des deux lames de cuivre entre elles et les différences de potentiel de chacune d'elles avec l'une des lames de zinc auxiliaires, on reconnaîtra que le siège de la *force électromotrice de polarisation* est, ici encore, presque exclusivement à la surface de la lame de cuivre sur laquelle se dégage l'hydrogène.

— Faire une expérience toute semblable en électrolysant l'eau avec les électrodes de zinc. La force électromotrice de polarisation est-elle la même? Est-elle localisée de la même manière que dans le cas des électrodes de cuivre?

Électrodes inattaquables. — Disposer une expérience analogue avec trois lames de platine. A défaut de platine, on prend trois crayons de charbon pour lampes à arc que l'on tient dans l'eau acidulée en les enfilant dans des bouchons fixés dans une planchette qu'on pose sur les bords du vase. Si les crayons de charbon ont été recouverts de cuivre par galvanoplastie à leur extrémité supérieure on peut y souder directement les fils de connexion.

Électrolyser l'eau au moyen d'un courant de l'ordre du dixième d'ampère, fourni par une pile d'au moins 4 volts (deux accumulateurs) et mettre un voltmètre en dérivation sur les deux électrodes.

Le voltmètre montre l'existence d'une force électromotrice de polarisation qui peut dépasser 2 volts et qui se maintient encore quelques instants après que l'on a coupé le courant.

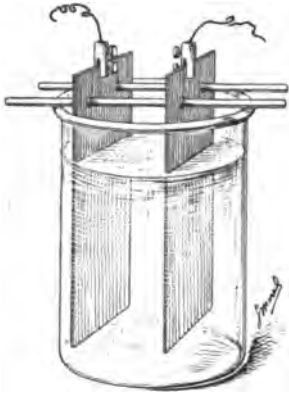
Rétablissant le courant, et faisant usage de l'électrode auxiliaire, on reconnaîtra que la force électromotrice de polarisation n'est plus localisée sur la seule électrode négative, mais que les deux électrodes participent à sa production, chacune environ pour moitié.

106. Polarisation de l'aluminium. — Préparer une cuve électrolytique ($V = 500\text{cm}^3$) contenant une solution à 5 pour 100 de *phosphate de potassium* additionnée d'une très petite quantité de potasse. Prendre comme électrodes deux lames d'aluminium

(15^{cm}; 5^{cm}; 0^{cm}, 05) que l'on aura laissé séjourner aussi longtemps que possible dans une solution étendue de potasse (M. *Pollack*).

Préparer aussi une électrode auxiliaire faite d'une lame de tôle de mêmes dimensions.

Placer un ampèremètre et le voltamètre à électrodes d'aluminium dans un circuit contenant une force électromotrice d'un voltage quelconque pouvant aller jusqu'à 140 volts. Au moment même de la fermeture du circuit il passe un courant notable, mais ce courant s'éteint de suite presque complètement.



Mettre alors dans le bain l'électrode auxiliaire de fer et chercher avec un voltmètre la différence de potentiel entre cette électrode et chacune des deux électrodes d'aluminium. L'expérience montre que *la chute de potentiel se produit à l'électrode positive*.

L'arrêt du courant est bien dû à l'électrode positive seule. Si l'on prend en effet la lame de fer comme électrode négative en conservant la même électrode positive d'aluminium, le courant ne passe toujours pas. Au contraire, si cette lame de fer est prise comme électrode positive avec une électrode négative en aluminium, le courant passe librement, ou du moins le voltamètre n'introduit plus qu'une force contre-électromotrice très faible.

— Dans tous ces essais, il est prudent de laisser, en permanence, dans le circuit, un rhéostat d'une résistance de quelques ohms, pour éviter la formation accidentelle d'un court-circuit.

107. Redressement des courants alternatifs. — Si l'on met l'appareil précédent avec ses deux électrodes d'aluminium dans le circuit d'un courant alternatif, il ne passe toujours qu'un courant insignifiant, qui est, du reste, alternatif.

Si nous prenons au contraire une électrode de fer et une électrode d'aluminium, nous obtiendrons un courant interrompu mais *toujours de même sens et qui aura une intensité moyenne égale à $\frac{E}{R}$* .

Des deux courants de sens contraires dont les alternances constituent le courant alternatif, un seul passe en effet librement, c'est celui pour lequel l'aluminium est le pôle négatif. Le courant de sens contraire est arrêté.

Le courant interrompu que l'on obtient ainsi peut parfaitement servir à la charge des accumulateurs; on règle alors son intensité avec un rhéostat. Avec les dimensions d'électrodes que nous indiquons ($15^{\text{cm}} \times 5^{\text{cm}}$), on peut redresser un courant de l'ordre de l'ampère.

108. Polarisation d'un voltamètre à sulfate de cuivre.

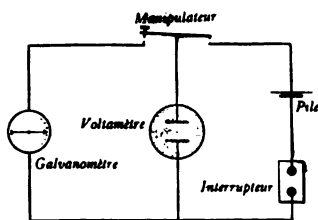
— Disposer un voltamètre avec deux électrodes de cuivre bien propres (**VII, 67**). S'assurer qu'il n'y a entre les deux électrodes aucune différence de potentiel appréciable en se servant d'un galvanomètre assez sensible pour déceler le dix-millième de volt, un galvanomètre à cadre mobile par exemple.

S'il existe une légère différence de potentiel, on la fera disparaître presque complètement en mettant les deux électrodes de cuivre en communication métallique et en déposant électrolytiquement sur toutes les deux une petite quantité de cuivre.

Quand il n'y a plus de différence de potentiel entre les deux lames de cuivre, on électrolyse le sulfate de cuivre en se servant d'une pile quelconque, et l'on règle le courant à une densité de 2 ou 3 ampères par décimètre carré d'électrode.

Après quelques instants d'électrolyse, on met, aussi rapidement que possible, le voltamètre en communication avec le galvanomètre pour chercher s'il existe une force électromotrice de polarisation. La force électromotrice que l'on trouve est, tout au plus, de l'ordre du millième de volt.

— Pour faire rapidement les commutations nécessaires dans les



expériences sur la polarisation, on peut se servir, soit d'un commutateur à bascule tel que celui que nous décrivons plus loin (**VII, 168**), soit de la *clef de manœuvre du télégraphe Morse* (**VII, 148**), disposée comme l'indique le diagramme ci-dessus.

109. Piles à concentration. — Préparer une solution concentrée de chlorure de zinc (30 pour 100). Verser environ 400^{cm^3}

d'eau dans un vase pouvant contenir 500^{cm}³, et l'additionner de quelques centimètres cubes de la solution concentrée.

Préparer, d'autre part, un tube de verre ($d = 1^{\text{cm}}, 5$; $l = 20^{\text{cm}}$) qu'on ferme à un bout par un tampon d'ouate hydrophile médiocrement compact.



Introduire lentement ce tube dans la solution étendue, et, en même temps, verser progressivement dans ce tube la solution concentrée de chlorure de zinc. On laisse toujours le niveau dans le tube un peu plus bas que le niveau extérieur afin que les deux liquides ne se mélangent pas malgré leur différence de densité.

L'équilibre de ces liquides étant établi, plonger dans le vase et dans le tube, pour servir d'électrodes, deux étroites lames de zinc bien propres, soudées à des fils de cuivre.

Relier ces électrodes à un circuit de mesure comprenant une résistance d'un millier d'ohms et un galvanomètre qui n'a pas besoin d'être très sensible.

Le galvanomètre dévie, indiquant que la pile à concentration possède une force électromotrice de plusieurs centièmes de volt.

Le sens de la déviation montre que le pôle négatif de la pile est formé par l'électrode qui plonge dans la solution étendue. Il en résulte que, si l'on ferme le circuit, le passage du courant aura pour effet de tendre à égaliser les concentrations.

Plonger ensuite les deux électrodes dans le même liquide, et constater qu'il n'existe plus entre elles qu'une différence de potentiel très petite.

— Voici une autre forme de l'expérience. On remplit à moitié une éprouvette avec une solution étendue de chlorure de zinc, puis on achève de la remplir en y versant une solution concentrée de ce sel. Pour éviter le mélange des couches, la solution concentrée est versée au moyen d'un tube à entonnoir pénétrant au fond de l'éprouvette, et fermé à sa partie inférieure par un tampon d'ouate hydrophile.

Laisser séjourner dans l'éprouvette une lame de zinc plongeant à la fois dans les deux couches liquides. Au bout de quelques heures, on verra des cristaux de zinc se déposer sur le zinc dans la

solution concentrée, tandis que le métal aura été attaqué dans la solution étendue (15 bis, 82 bis).

EFFETS CALORIFIQUES DU COURANT ÉLECTRIQUE.

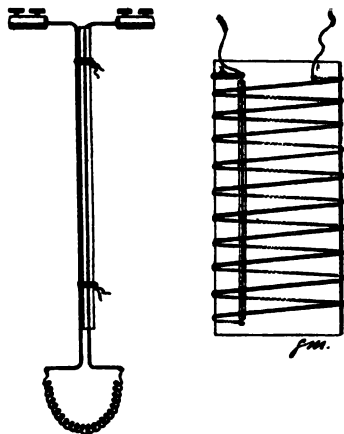
110. Conducteur à résistance constante. — Les expériences calorimétriques ne sont commodes que si l'on dispose d'une puissance d'au moins une quarantaine de watts, puisque c'est cette puissance qui est nécessaire pour obtenir environ une demi-calorie à la minute.

On prend, comme résistance constante, du fil de manganine d'un diamètre approprié aux intensités de courant que l'on a à employer (¹). Si l'on dispose, par exemple, de 8 ampères sous 10 volts, on prendra 60^{cm} de fil de 0^{cm},05 de diamètre.

Montage. — Enrouler d'abord ce fil en spires serrées autour d'un objet quelconque tel qu'un tube à essais, puis retirer ce support pour laisser les spires s'ouvrir, et souder les deux bouts du fil à des tiges de cuivre rouge ($d = 0^{\text{cm}}, 2$; $l = 25^{\text{cm}}$). Passer l'une de ces tiges dans un tube de verre ($l = 20^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 7$), et attacher l'autre tige le long de ce tube de verre.

L'appareil ainsi disposé est soutenu dans un calorimètre, en ayant soin que les spires de fil ne se touchent pas et ne touchent pas les parois.

Si l'on est conduit à employer de grandes longueurs de fil fin ($d = 0^{\text{cm}}, 025$), ce fil sera enroulé sur une lame de verre (plaque photographique $6^{\text{cm}}, 5 \times 9^{\text{cm}}$ *extra-mince*), le fil d'aller protégé contre le contact du fil de retour au moyen d'un petit tube de verre, et les bouts du fil attachés aux coins de la lame de verre, en les faisant passer dans deux trous que l'on y aura percés à environ 1^{cm} des bords (I, 102).



(¹) Les fils de 0^{cm},025 et de 0^{cm},05 de diamètre, *plongés dans l'eau*, pourraient sans accident supporter respectivement des courants d'environ 10 et 60 ampères.

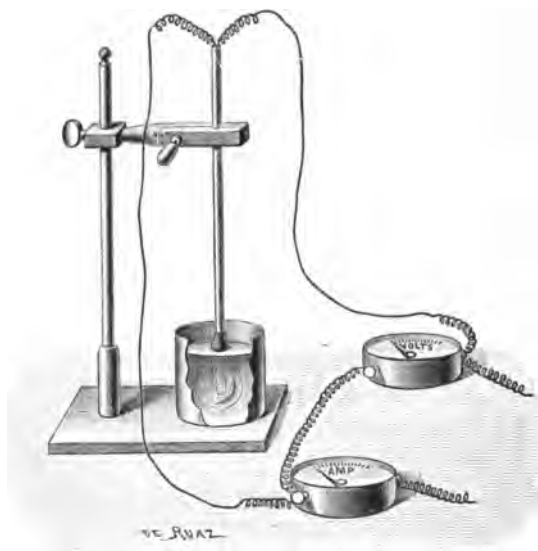
Expériences. — Mettre dans le calorimètre environ $\frac{1}{2}$ litre d'eau, et y placer le fil de manganine avec un agitateur et un thermomètre donnant au moins le dixième de degré.

Faire passer, pendant quelques minutes, dans le fil de manganine, un courant constant auquel on donnera successivement plusieurs valeurs variant entre 2 et 8 ampères.

Pour chacune de ces expériences, on notera, à une demi-seconde près, la durée du passage du courant.

Chacune des quantités de chaleur dégagées, corrigée s'il y a lieu des pertes que subit le calorimètre (IV, 69), sera divisée par la durée de l'expérience correspondante. Les quotients obtenus devront être trouvés exactement proportionnels aux carrés des intensités (110, 175, 200).

111. Conducteurs quelconques. — Soutenir une lampe à incandescence (16 ou 32 bougies) au milieu d'un calorimètre.



Pour éviter le contact des fils conducteurs avec l'eau, on les fait passer dans un tube de verre mastiqué sur la lampe.

Mettre un ampèremètre dans le circuit de la lampe et placer un voltmètre en dérivation, comme l'indique la figure. Mettre dans le calorimètre une masse d'eau connue (500^g), et prendre la température initiale. Faire passer le courant pendant plusieurs minutes en mesurant l'intensité et la force électromotrice.

Noter la durée de l'expérience, ainsi que la température finale (**IV, 59**).

De ces mesures, on déduira la quantité de chaleur recueillie, et on la comparera au produit EIt de la différence de potentiel par la quantité d'électricité qui a passé.

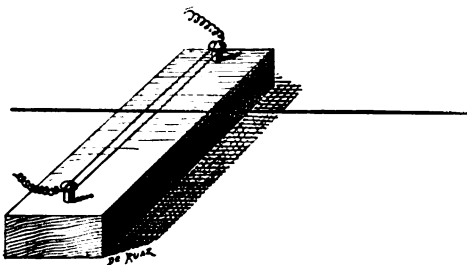
Le courant I , qui figure dans cette formule, est le courant mesuré par l'ampèremètre, supposé diminué de celui qui passe dans le voltmètre. Cette correction est-elle assez importante pour qu'il soit nécessaire d'en tenir compte? Aurait-on à faire une correction moindre si l'on mesurait la différence de potentiel totale de la portion du circuit contenant l'ampèremètre et la lampe à incandescence?

— Les expériences seront reprises d'abord en modifiant l'intensité et la durée du passage du courant, puis en remplaçant la lampe à incandescence employée par une autre lampe de puissance très différente. On continuera à comparer la quantité de chaleur avec l'expression EIt de l'énergie électrique. Le rapport de ces deux quantités reste-t-il constant au degré de précision des mesures?

— D'après les expériences que l'on vient de faire, quel serait l'équivalent mécanique de la calorie, en supposant le voltmètre et l'ampèremètre exactement étalonnés? L'étalonnage du thermomètre est-il aussi sûr que celui des instruments qui servent pour les mesures électriques?

Lumière électrique. — Étudier avec un photomètre l'intensité lumineuse d'une lampe à incandescence plus ou moins *poussée*. Construire la courbe donnant le prix en *watts* de la *bougie* sous les divers régimes (**VI, 13**).

Expériences qualitatives. — Mettre en évidence l'allongement



d'un fil métallique traversé par un courant (**IV, 8**). — Déterminer l'intensité maxima que peut supporter un fil de cuivre ou de fer ($d = 0^{\text{cm}}, 05$) sans rougir, et l'intensité maxima que peut supporter

un fil de plomb de même diamètre sans fondre. — Fixer sur une planche (50^{cm}, 10^{cm}, 1^{cm}) deux fils de même diamètre (0^{cm}, 05), l'un en fer, l'autre en cuivre, et envoyer dans ces fils, réunis en série, un courant que l'on fera croître jusqu'à quelques ampères. Quel est le fil qui s'échauffe le plus et qui rougit le premier? Quel est, au contraire, le résultat de l'expérience si les fils sont réunis en parallèle (146)?

— L'éclaircissement produit par les lampes électriques à courants alternatifs présente des variations synchrones du courant. Le phénomène est très marqué avec des lampes à incandescence à filament très fin et surtout avec l'arc électrique. On le montrera par exemple en déplaçant rapidement une baguette brillante devant un fond noir (VII, 193).

112. Dégagement de chaleur dans un électrolyte. — Mettre 500^{cm³} d'une solution saturée de sulfate de cuivre dans un



vase à filtrations chaudes, forme haute (verre mince). Prendre comme électrodes deux plaques de cuivre ($e = 0^{\text{cm}}, 05$) soudées à des fils de cuivre et occupant presque toute la section du vase. L'une d'elles est posée au fond et le fil de cuivre correspondant est protégé par un tube de verre; l'autre plaque est soutenue horizontalement vers la partie supérieure du vase. Envoyer dans l'électrolyte un courant alternatif de quelques ampères, ou un courant continu dont on renverse fréquemment le sens pour atténuer

les variations de concentration aux électrodes (VII, 84).

Laisser passer le courant pendant quelques minutes, noter la durée de l'expérience, l'intensité moyenne, la différence de potentiel moyenne, et déterminer l'échauffement du liquide.

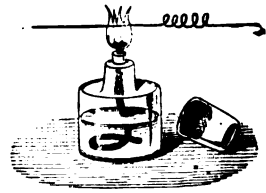
On vérifiera que l'échauffement varie bien comme le produit EIt ; et l'on déduira de ces mesures la valeur de la chaleur spécifique de la solution de sulfate de cuivre.

THERMOÉLECTRICITÉ.

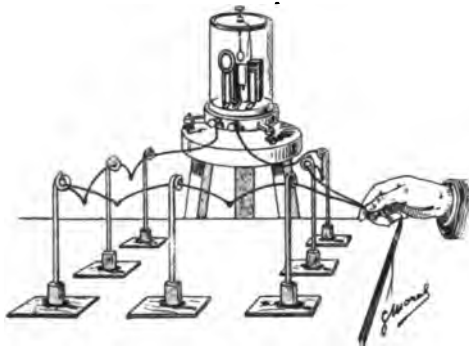
113. Forces électromotrices thermoélectriques. — *Circuit d'un seul métal.* — Mettre un fil de cuivre rouge recuit ($l = 100^{\text{cm}}, d = 0^{\text{cm}}, 1$) dans le circuit d'un galvanomètre à cadre

mobile de faible résistance. Chauffer le fil en un point quelconque et constater que l'on n'obtient aucun courant. A quel degré de précision peut-on affirmer que l'échauffement du fil n'a introduit aucune force électromotrice?

Métal écroui et métal recuit. — Recommencer l'expérience avec un fil de laiton *écroui*. Quand on le chauffe en un point, même jusqu'au rouge, on n'obtient toujours aucun courant. Mais l'ayant *recuit* sur une certaine longueur, si l'on vient à chauffer l'un des points de jonction de la partie recuite et de la partie écrouie, on obtient un courant. Le sens du courant change avec le point de jonction que l'on chauffe.



Circuit formé de plusieurs métaux. — Mettre dans le circuit du galvanomètre plusieurs fils de métaux différents, cuivre, fer, laiton, argent, etc. On les joint les uns aux autres, soit en les

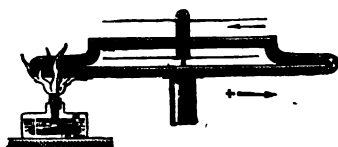


soudant, soit en tordant fortement ensemble avec une pince plate les extrémités de deux fils consécutifs. On soutient tous ces fils au moyen de tiges de verre, afin d'assurer leur isolement.

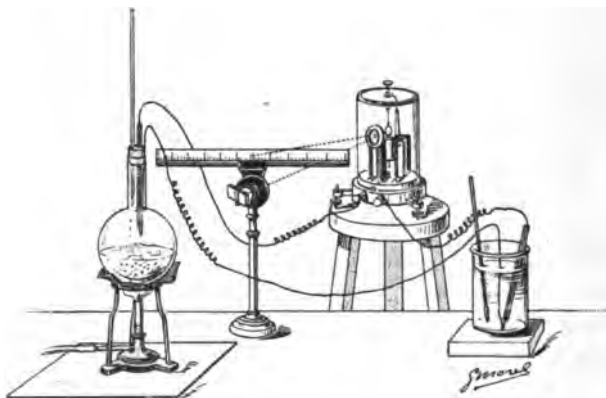
Tant qu'on laisse ce circuit à température uniforme, on n'observe aucun courant. On n'a encore aucun courant sensible en chauffant l'un des fils à une bonne distance des soudures. Mais un courant très net se manifeste si l'échauffement est produit au point de contact de deux fils de nature différente.

— On trouve parfois dans les cabinets de physique un appareil constitué par un circuit *maillechort-cuivre* de très faible résistance formant cadre galvanométrique à l'égard d'un système *astatique*

de deux aiguilles aimantées. Dès que l'on chauffe l'une des soudures, le système astatique dévie fortement.



114. Étude d'un couple thermoélectrique. — Montage. — Constituer un couple fer-cuivre au moyen d'un fil de fer ($d = 0^{\text{cm}}, 05$, $l = 100^{\text{cm}}$) soudé ou fortement tordu à ses deux extrémités avec des fils de cuivre. Enfiler les fils de cuivre dans des tubes de verre ($d = 0^{\text{cm}}, 6$; $l = 20^{\text{cm}}$) de manière qu'ils ne



puissent pas toucher les fils de fer au voisinage des points de jonction et attacher les extrémités libres du circuit aux deux bornes d'un galvanomètre à cadre mobile.

On a une sensibilité convenable en prenant un galvanomètre d'une centaine d'ohms de résistance qui donne une déviation visible pour une intensité d'un microampère.

En raison de la petitesse des forces électromotrices en jeu, les appareils devront être soigneusement isolés sur du verre ou de la paraffine, et l'on aura bien soin de ne pas laisser traîner les fils sur la table.

Pour que les températures soient bien définies au moment des expériences que nous allons décrire, on placera chacune des sou-

dures, soit dans un vase de verre contenant de la glace *pure* ou de l'eau *distillée*, soit dans l'atmosphère d'un petit ballon où l'on fera bouillir de l'eau.

Les mesures pourront être étendues à de plus grands intervalles de température, d'une part en remplaçant la glace par de la neige carbonique ou de l'air liquide et, d'autre part, en remplaçant la vapeur d'eau par de la vapeur d'aniline. On devra alors munir le ballon d'un tube de reflux pour la condensation de la vapeur (110, 140).

Loi des températures intermédiaires. — Mettre l'une des soudures dans la glace et l'autre dans de l'eau tiède que l'on maintiendra par exemple à 40°. Noter la déviation du galvanomètre.

Placer ensuite la première soudure dans la vapeur d'eau en laissant la seconde soudure à cette même température de 40° et noter encore la déviation du galvanomètre.

Faire enfin une troisième mesure de déviation avec une soudure dans la glace et l'autre dans la vapeur. Le courant obtenu dans cette troisième expérience doit être la somme des courants que l'on avait trouvés dans les deux autres (1).

Graduation du couple thermoélectrique. — Maintenir l'une des soudures dans la glace et porter l'autre soudure d'abord dans de l'eau à la température ambiante, puis, successivement, dans de l'eau tiède, dans de l'eau chaude et dans de la vapeur d'eau.

Construire la courbe des déviations en fonction de la température. Cette courbe est-elle sensiblement rectiligne?

Quelle est la valeur des forces électromotrices développées?

Mesure d'une température. — Mettre la soudure thermoélectrique dans un tube à essais contenant de la naphthaline. Chauffer la naphthaline jusqu'à la fusion complète, puis laisser refroidir lentement, en agitant toujours le liquide pour uniformiser les températures.

Construire la courbe représentant les déviations du galvanomètre en fonction du temps, aussi bien pendant l'échauffement que pendant le refroidissement. Relever sur cette courbe la déviation gal-

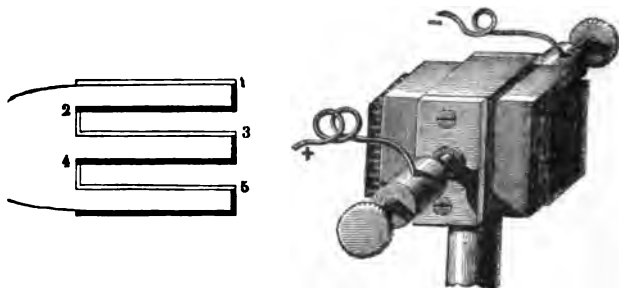
(1) C'est entre les *forces électromotrices* que la relation a lieu. Les *intensités de courant* ne leur sont pas exactement proportionnelles en raison des variations de la résistance des fils avec la température. Il serait donc plus correct de faire les mesures de thermo-électricité en déterminant les *forces électromotrices* par une méthode d'opposition (VII, 63 et 64). Comme les forces électromotrices à mesurer sont très faibles, on prend pour terme de comparaison une fraction seulement de la force électromotrice d'une pile hydroélectrique (VII, 74).

vanométrique correspondant au point de fusion. Quelle est la température correspondante?

Inversion du couple fer-cuivre. — Chauffer directement l'une des soudures dans la flamme d'un bec Bunsen jusqu'à la température du rouge. La déviation augmente d'abord, elle passe par un maximum, décroît ensuite, puis s'annule et se produit ensuite en sens inverse.

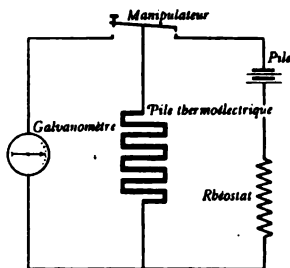
115. Effet Peltier. — Le dégagement et l'absorption de chaleur aux soudures par le passage du courant sont très faibles. Ils suffisent cependant pour créer dans un couple thermoélectrique des différences de température entre ces soudures et, par conséquent, une force contre-électromotrice qui subsiste pendant quelques instants après le passage du courant.

L'expérience se fait bien avec une pile de Nobili et Melloni. Les



éléments *bismuth-antimoine* de la pile sont montés en série, toutes les soudures paires d'un côté et toutes les soudures impaires de l'autre côté, comme l'indique la figure.

On polarise suffisamment cette pile au moyen d'un courant de l'ordre de 1 ampère qu'on laisse passer pendant 1 ou 2 secondes.



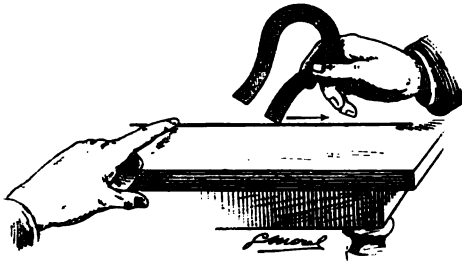
Le dispositif expérimental est le même que celui qui nous a servi pour montrer la polarisation d'un voltamètre (VII, 108). On emploie encore un commutateur à bascule (VII, 168) ou bien le *manipulateur du télégraphe Morse* (VII, 148); on met d'abord la

pile thermoélectrique en communication avec une pile et un rhéostat, de façon à y faire passer un courant d'environ 1 ampère.

Au bout d'un instant, on fait basculer le commutateur pour fermer le circuit de la pile thermoélectrique sur un galvanomètre, et l'on constate la production du courant de polarisation. Ce courant est en sens inverse de celui qui a produit cette polarisation (100).

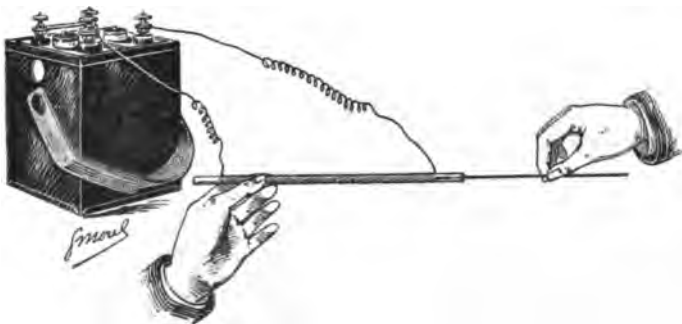
AIMANTS.

116. Aimants artificiels. — Les aimants en fer à cheval un peu gros, que l'on trouve couramment dans le commerce, peuvent servir à aimanter des tiges d'acier telles que des aiguilles à coudre



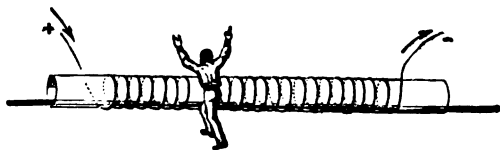
ou des aiguilles à tricoter. Il suffit de passer plusieurs fois dans le même sens l'une des extrémités de l'aimant le long de la tige d'acier.

— On peut aussi employer le courant électrique. Si l'on peut avoir 2 ampères sous 4 volts, on prépare le solénoïde magnéti-



sant avec du fil de cuivre isolé ($d = 0^{\text{cm}}, 04$) enroulé sur un tube de verre ($d = 0^{\text{cm}}, 7$; $l = 30^{\text{cm}}$) en une hélice à spires contiguës. Les dernières spires sont fortement liées sur le tube de verre avec de la ficelle fine.

Mettre une aiguille à tricoter dans ce solénoïde et faire passer le courant. L'aiguille s'aimante, le pôle nord se produisant à la gauche du *bonhomme d'Ampère* qui figure le courant.

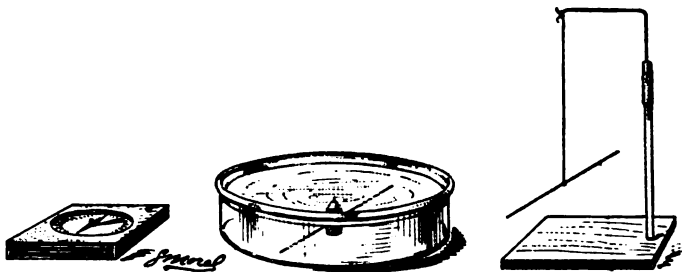


117. Pôles. — En attirant des clous ou de la limaille de fer avec une tige d'acier aimantée, on reconnaît que la puissance d'attraction paraît résider en certaines *régions polaires* assez nettement définies (*fig. p. 287*).

118. Pôle nord et pôle sud. — L'aiguille aimantée d'une boussole s'oriente spontanément. Les deux *pôles* ne sont donc point identiques.

On peut se procurer à très bon compte des boussoles sur lesquelles on détermine l'orientation de l'aiguille à un demi-degré près.

— Si l'on veut faire l'expérience avec une aiguille à tricoter ou



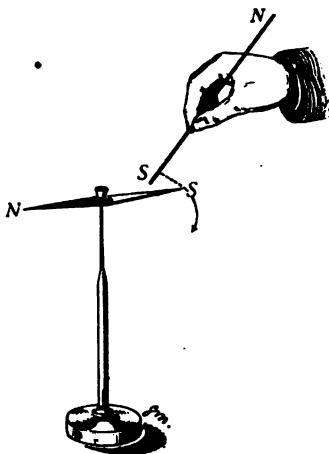
une aiguille à coudre que l'on vient d'aimanter, le *meilleur moyen* est de suspendre cette aiguille à un fil de soie très fin (*fil de cocon, ou soie à dentelle* dédoublée). — On peut aussi la soutenir dans l'eau au moyen d'un petit bouchon de liège. Dans ce cas, on fera bien de ne laisser qu'une pointe de liège affleurer la surface de l'eau; les mouvements de l'aiguille seront plus libres (77).

— On peut encore faire porter l'aimant mobile sur la pointe

d'une aiguille au moyen d'un tube de verre ($d = 0^{\text{cm}}, 5$; $l = 2^{\text{cm}}$) fixé dans un morceau de liège ($2^{\text{cm}}, 2^{\text{cm}}, 1^{\text{cm}}$) (87).

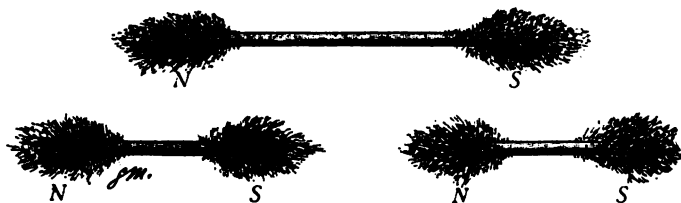


Attractions et répulsions. — Au moyen de ces aiguilles mobiles, on démontre que deux pôles nord ou deux pôles sud se repoussent, tandis que deux pôles de noms contraires s'attirent.



On notera, en particulier, que ces actions se transmettent au travers des corps non magnétiques.

119. Expérience de l'aimant brisé. — Aimanter une ai-



guille à tricoter et reconnaître l'existence des pôles nord et sud à ses deux extrémités.

Casser ensuite l'aiguille en un point quelconque et constater qu'il s'est développé deux pôles de noms contraires à la brisure.

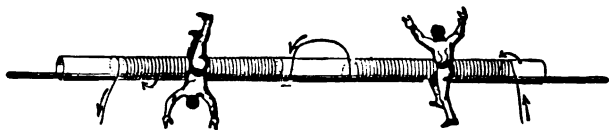
En rapprochant les deux moitiés de l'aiguille, on reconstitue l'aimant primitif et les pôles intermédiaires semblent avoir presque disparu.

— Aimanter un ressort de montre ($l = 30^{\text{cm}}$), puis le courber de manière à en rapprocher les deux bouts. L'anneau obtenu n'a plus sensiblement de pôles (100).

— Un tube à essais est rempli de limaille de fer. On passe le long du tube le pôle d'un bon aimant. La limaille possède alors nettement des pôles magnétiques aux deux extrémités du tube. Mais toute aimantation semble disparaître quand on l'agite (175).

120. Aimants ayant plus de deux pôles. — On fait naître trois pôles, nord, sud et nord, sur une même aiguille à tricoter en frottant les deux bouts de l'aiguille avec le pôle sud d'un bon aimant et en frottant le milieu de l'aiguille avec le pôle nord.

On arrive au même résultat en aimantant l'aiguille au moyen d'un solénoïde semblable à celui que nous avons décrit plus haut



(VII, 116), mais dont l'enroulement est partagé en deux parties. Le second enroulement est en sens inverse du premier, ou bien l'on y fait passer le courant en sens inverse, de manière que les deux moitiés du solénoïde tendent à créer des aimantations de sens contraire.

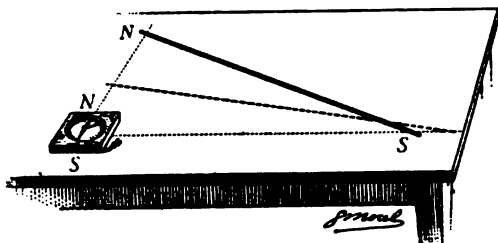
MESURE DE L'INTENSITÉ DU CHAMP MAGNÉTIQUE. LOI DU CARRÉ DES DISTANCES.

121. Expériences d'oscillations. — Aimanter une longue tige d'acier ou de fer ($l = 100^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 6$) et se procurer une boussole. L'aiguille de la boussole doit être courte ($l < 5^{\text{cm}}$) et bien suspendue; elle peut être soutenue par fil de soie, ou bien portée sur une pointe à chape de pierre.

Mettre la boussole sur la table et éloigner le plus possible le long

aimant. Faire osciller l'aiguille aimantée et mesurer la durée de dix ou de vingt oscillations.

Poser ensuite la tige aimantée sur la table dans une position oblique par rapport au méridien magnétique. Son pôle nord sera



placé exactement au nord de la boussole à une distance ne dépassant pas la moitié de sa longueur ($\frac{l}{2} = 50^{\text{cm}}$); et son pôle sud sera exactement à l'est ou à l'ouest.

Dans cette position, le champ dans lequel l'aiguille aimantée oscille est égal au champ terrestre diminué arithmétiquement du champ créé par l'aimant; et ce champ est dû principalement au pôle le plus voisin de la boussole.

On arriverait encore à ce résultat d'isoler en quelque sorte l'action d'un seul des deux pôles en plaçant le second pôle de la tige aimantée au-dessus de la boussole, comme nous l'indiquons plus loin (VII, 122).

Les instruments étant ainsi disposés, mesurer de nouveau la durée des oscillations de l'aiguille aimantée et relever à quelques millimètres près la distance du centre de la boussole au pôle le plus voisin de la tige aimantée.

Répéter les mesures pour différentes distances du pôle actif en ayant soin de placer chaque fois la tige aimantée de manière que la position d'équilibre de la boussole soit toujours à peu près la même.

Quand on diminue la distance de la tige aimantée à la boussole, on voit d'abord les oscillations se ralentir et devenir même extrêmement lentes. Puis, brusquement, l'aiguille se retourne et les oscillations deviennent ensuite de plus en plus rapides à mesure que la distance diminue.

On ne se rapprochera pas plus près qu'une dizaine de centimètres

pour que, dans les calculs, on puisse encore considérer l'aiguille de la boussole comme très petite (¹).

Quand le pôle actif passe au sud de la boussole et s'éloigne, les oscillations se ralentissent de nouveau et finissent par retrouver leur durée initiale quand ce pôle est suffisamment loin.

Pour construire la courbe représentant les variations de période observées, on prendra pour coordonnées les inverses des carrés des temps et les inverses des carrés des périodes. Conformément à la loi du carré des distances, on constatera que cette courbe est formée de trois segments de droite également inclinés sur les axes.

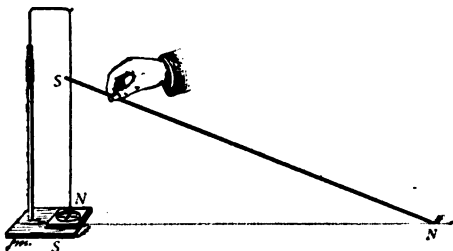
Y a-t-il lieu de faire une petite correction pour tenir compte de l'action du pôle éloigné que nous avons considéré comme inactif?

— Il n'est pas sans importance de constater que les forces que l'on exercerait avec l'autre pôle de la tige aimantée seraient de sens contraire, mais exactement égales à celles que nous venons d'étudier.

122. Expériences de déviations. — Prendre encore une boussole ($D = 7^{\text{cm}}$) et une longue tige aimantée ($l = 100^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}},6$) et poser la boussole sur la table. Suspendre un fil à plomb ($l = 80^{\text{cm}}$) au-dessus de la boussole, pour matérialiser la verticale passant par le milieu de l'aiguille aimantée.

Noter à un demi-degré près la position d'équilibre de la boussole quand on a éloigné le plus possible la longue tige aimantée, ou, mieux encore, quand on a placé cette tige verticalement et aussi haut que possible au-dessus de la boussole.

Ne touchant plus à la boussole, placer maintenant l'un des



pôles de la tige aimantée le long du fil à plomb, pour qu'il ne fasse pas dévier la boussole, et faire reposer l'autre extrémité de la tige

(¹) Les expériences pourront être poursuivies à des distances plus petites si l'on remplace la boussole par un magnétomètre à aimant court (VII, 124).

de fer sur la table, exactement à l'est ou à l'ouest de cette boussole. Noter encore à un demi-degré près la position d'équilibre de l'aiguille aimantée et mesurer, à un demi-centimètre près, la distance de cette boussole au pôle actif de la tige aimantée.

Répéter ces mesures à différentes distances de part et d'autre de la boussole.

Il sera inutile de faire des mesures pour des déviations qui n'atteindraient pas plusieurs degrés, car les lectures seraient trop peu précises. On ne rapprochera pas non plus le pôle actif à une distance de la boussole plus petite qu'une dizaine de centimètres, pour qu'on puisse encore faire les calculs en considérant l'aiguille aimantée comme très petite.

On construira ensuite la courbe représentative des expériences en prenant comme coordonnées la *tangente* de la déviation et l'inverse du carré de la distance de la boussole au pôle qui agit sur elle. On constatera, conformément à la loi de Coulomb, que cette courbe est rectiligne, au degré même de la précision que nous avons indiquée pour les mesures.

123. Composition des champs magnétiques. — Ayant placé le pôle nord d'une tige aimantée au sud de la boussole et ayant mesuré la période d'oscillation, on retire cette tige aimantée, on place le pôle sud d'un autre aimant au nord de la boussole et l'on mesure la nouvelle durée d'oscillation. On fait ensuite agir simultanément les deux tiges aimantées et l'on mesure encore la durée d'oscillation.

L'ensemble de ces mesures démontre-t-il que le champ résultant est la somme des champs composants?

— Si l'on compare les résultats obtenus avec la même tige aimantée dans des expériences d'oscillations et dans des expériences de déviation (**VII, 121** et **122**), on constatera que l'on obtient les mêmes valeurs de la force magnétique par les deux procédés. Il en résulte un contrôle de la loi de composition des champs magnétiques que l'on avait implicitement admise dans le calcul des expériences.

124. Emploi d'un magnétomètre à aimant court. — *Montage du magnétomètre.* — Aimanter plusieurs morceaux de ressort de montre ($l = 1^{\text{cm}}$) et les coller côte à côte le long d'une tige métallique plate très légère, obtenue en aplatissant au marteau un fil de cuivre ou d'aluminium ($d = 0^{\text{cm}}, 1$). Coller aussi un miroir *plan* de galvanomètre (**I, 65**) sur la même tige, derrière les aimants.

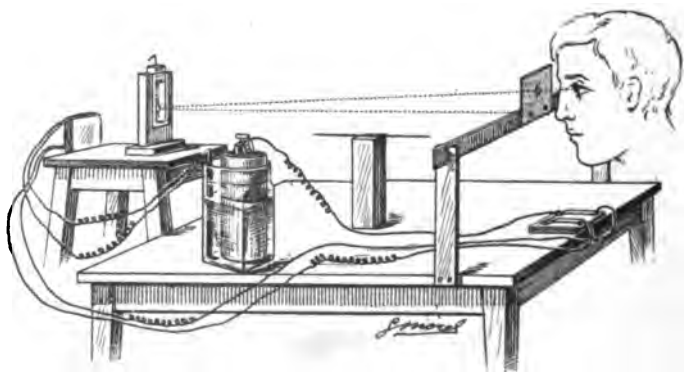
Pour pouvoir suspendre ce magnétomètre à l'abri des courants d'air, on prend une plaque de bois (15^{cm} ; 6^{cm} ; 2^{cm}) et l'on y pratique une entaille ($10^{\text{cm}} \times 3^{\text{cm}}$) qui ne laisse plus qu'une sorte de U en bois. La partie supérieure de la cavité est fermée par un parallélépipède de liège ($h = 2^{\text{cm}}$). On traverse ce bloc de liège suivant l'axe par un fil de cuivre ($d = 0^{\text{cm}}$, 1 ; $l = 5^{\text{cm}}$) et c'est à ce fil de cuivre que l'on suspend l'équipage mobile par l'intermédiaire d'un *fil de cocon* ou d'une *fibres de quartz* (**I, 106**) de quelques centimètres de longueur.



Le fil de cocon peut être noué sur les tiges métalliques que l'on termine alors en forme de crochet. Il est plus commode de mettre sur la tige métallique une goutte d'arcanson (**I, 55**) que l'on refond sur place à l'aide d'une baguette de fer chauffée et d'incorporer l'extrémité du fil de cocon dans

ce mastic alors qu'il est encore fondu.

Une fois l'équipage mobile mis en place, on ferme la cage avec des glaces qui débordent l'ouverture d'environ 0^{cm} , 5 . On maintient ces glaces avec des glissières ou bien avec des pointes en laiton



et du mastic de vitrier; on peut même, plus simplement, les faire adhérer avec une couche mince de cire molle que l'on écrase fortement entre le verre et le bois.

Expériences. — Installer le magnétomètre sur un support indépendant de la table d'expériences ($h = 130^{\text{cm}}$), en l'orientant de manière que le miroir soit à peu près parallèle aux glaces. Disposer un mètre horizontalement en avant et à environ 100^{cm} du miroir; fixer contre le milieu du mètre un diaphragme pour définir la position de l'œil ($5^{\text{cm}} \times 5^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}}, 05$; ouverture $d = 0^{\text{cm}}, 3$).

Mettre la règle graduée à la hauteur qui convient pour qu'on voie son image par réflexion sur le miroir quand on place l'œil derrière le diaphragme. Noter à moins de 1^{mm} près la position du point de la règle que l'on aperçoit au milieu du champ quand on a éloigné tout aimant et que le magnétomètre est en équilibre. Pour mieux définir le point visé, on aura pu tracer à l'encre un trait vertical au milieu du miroir.

Ceci fait, prendre un aimant un peu fort tel qu'un paquet de 5 aiguilles à tricoter qui auront été aimantées individuellement. Orienter cet aimant perpendiculairement au méridien magnétique, et le placer à environ 50^{cm} du magnétomètre, le milieu de l'aimant aussi exactement que possible sur l'alignement est-ouest de ce magnétomètre. Mesurer alors, à quelques millimètres près, la distance du milieu de l'aimant au magnétomètre. Retourner l'aimant bout pour bout, et déterminer le déplacement du point que l'on vise sur la règle. Éloigner ensuite l'aimant, et répéter la mesure à différentes distances du magnétomètre.

Mesurer enfin la distance de l'échelle graduée au miroir.

Au degré de précision des mesures, peut-on admettre que la *tangente* de la rotation du miroir est la moitié de la *tangente* de la rotation du rayon lumineux?

Construire la courbe ayant pour coordonnées la *tangente* de l'angle de rotation et l'inverse du cube de la distance. Cette courbe est-elle sensiblement rectiligne?

Relever sur la courbe la valeur moyenne du rapport des coordonnées. Quel est, d'après ces mesures, le rapport $\frac{M}{H}$ de la valeur du *moment magnétique* du barreau à la valeur de la composante horizontale du champ magnétique terrestre dans le magnétomètre?

— Faire des mesures semblables en plaçant le milieu du barreau aimanté dans l'alignement nord-sud du magnétomètre, mais en laissant encore ce barreau orienté perpendiculairement au méridien magnétique. La loi du carré des distances exige que les tangentes

des rotations qui se produisent dans cette position soient exactement moitié de celles qu'on obtenait tout à l'heure aux mêmes distances.

— *Les deux lois que nous venons de voir concernant l'action d'un barreau court, jointes au principe de l'égalité de l'action et de la réaction, suffisent pour faire connaître les propriétés du champ magnétique sans que l'on ait besoin de faire appel aux notions de pôles et de masses magnétiques positives et négatives qui présentent, peut-être, un caractère moins expérimental que la notion de moment magnétique.*

Comparaison de divers moments magnétiques. — Les dispositifs qui précèdent fournissent le moyen le plus simple de faire cette comparaison. Les moments magnétiques sont proportionnels aux déviations que les deux aimants à comparer produisent sur le magnétomètre quand on les met l'un après l'autre à la même place.

— La comparaison des moments magnétiques peut encore se faire en cherchant à quelle distance on doit placer le second aimant pour que son action compense celle du premier (175).

— On détermine la *valeur absolue* de ces moments magnétiques en remplaçant les aimants étudiés par un circuit de dimensions mesurées où l'on envoie un courant d'intensité connue (VII, 154).

Amortissement électromagnétique. — Dans toutes les expériences où l'on veut, comme ici, prendre la position d'équilibre d'un aimant qui oscille librement, il est utile de pouvoir amortir les oscillations. On y arrive en plaçant près de l'aimant mobile un circuit dans lequel on envoie au moment voulu des courants dont le champ magnétique tend à s'opposer au mouvement du barreau.

On place, par exemple, derrière le magnétomètre une plan-



chette (5^{cm}; 5^{cm}; 1^{cm}) sur laquelle on enroule en double quelques tours de fil isolé (*fig.* p. 292). Pour amortir les oscillations, il suffit de faire passer alternative-

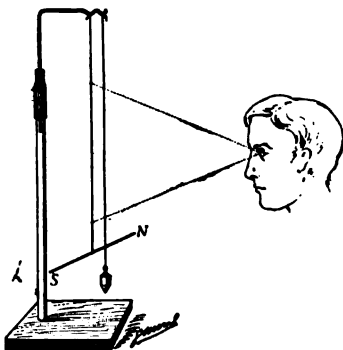
ment, dans ces deux enroulements, des courants de sens contraires qui pourront être de moins de 1 ampère.

A cet effet, l'une des extrémités de chacun des deux enroulements est reliée en permanence à l'un des pôles d'une pile en croisant les connexions. Les deux extrémités libres des enroulements

doivent pouvoir être reliées alternativement à l'autre pôle de la pile. Cette commutation se fait au moyen d'un interrupteur à deux touches que l'on construit aisément avec une planchette (10^{cm}; 5^{cm}; 1^{cm}, 5), quatre vis en laiton et deux lames de laiton battu (8^{cm}; 0^{cm}, 8; 0^{cm}, 05). On peut aussi prendre un seul circuit amortisseur et y envoyer le courant dans un sens ou dans l'autre au moyen d'un commutateur à bascule (VII, 168).

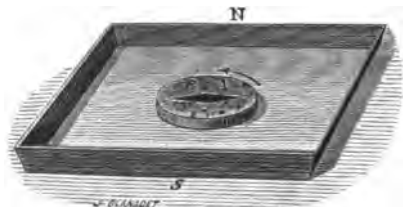
CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE.

125. L'action du champ terrestre sur un aimant court se réduit sensiblement à un couple. — En ce qui concerne la composante horizontale du champ, cette proposition résulte immédiatement de ce que, dans toutes les expériences que nous décrirons plus loin, les fils de suspension qui portent des aiguilles aimantées restent exactement verticaux. On s'assure qu'il en est



bien ainsi en suspendant un fil à plomb à côté de l'aiguille aimantée : les deux fils de suspension se projettent exactement l'un sur l'autre.

— On constate, de même, qu'une aiguille aimantée qui flotte

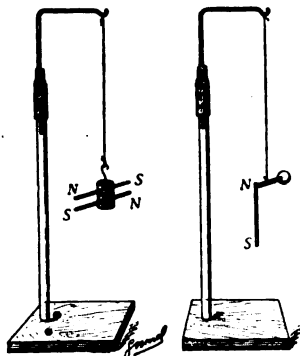


sur l'eau, s'oriente mais ne prend aucun mouvement de translation.

— On complète la démonstration en vérifiant que le poids d'une tige d'acier ne change pas quand on l'aimante.

La pesée doit se faire, naturellement, sur une balance dont le fléau ne soit pas en acier.

126. Systèmes astatiques. — Fixer dans un bouchon



($h = 2^{\text{cm}}$, $d = 1^{\text{cm}}$) deux aiguilles d'acier également aimantées dont on inverse les pôles. Ce sont par exemple les deux moitiés d'une aiguille à tricoter qu'on a fortement aimantée puis cassée en son milieu (**VII, 119**). Le système, suspendu à un fil de soie, oscille *très lentement* sous l'action du champ terrestre, puisque les couples exercés par la terre sur les deux aiguilles sont de sens contraires et sensiblement égaux.

On s'assurera qu'en retournant l'une des aiguilles aimantées, les oscillations deviennent beaucoup plus rapides.

— On pourra encore constater qu'un aimant ne s'oriente pas dans le champ terrestre quand il est suspendu *verticalement* au bout d'un levier horizontal attaché au fil de suspension.

127. Déclinaison. — *Méridien magnétique.* — Aimanter une aiguille à tricoter et la suspendre à un fil de soie fin (*soie à dentelle dédoublée*, $l = 50^{\text{cm}}$).

On attache d'abord le fil de soie à un fil de cuivre recourbé en forme de crochet et passé dans un bouchon de liège et on laisse pendre le tout verticalement pour permettre au fil de soie de se détordre s'il y a lieu. On enfle ensuite l'aiguille à tricoter dans le bouchon et l'on règle la suspension de manière que l'aiguille se tienne à peu près horizontalement.

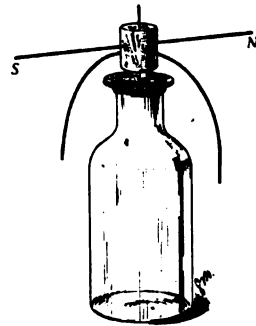
L'axe de l'aiguille et le fil de suspension définissent le méridien magnétique. On matérialise la trace de ce plan en plaçant l'œil de manière que ces deux lignes se projettent l'une sur l'autre et en marquant à la craie sur le sol ou sur les parois de la salle deux traits assez éloignés situés dans le plan de visée. L'incertitude de cette détermination est seulement de quelques minutes d'angle.

Avant d'aller plus loin on s'assurera que la torsion du fil de soie n'intervient pas. Il n'y a pour cela qu'à faire faire à l'aiguille

aimantée plusieurs tours autour de la verticale et à constater que sa position d'équilibre n'a pas sensiblement varié.

— On déterminerait encore assez bien le méridien magnétique avec une boussole à pivot.

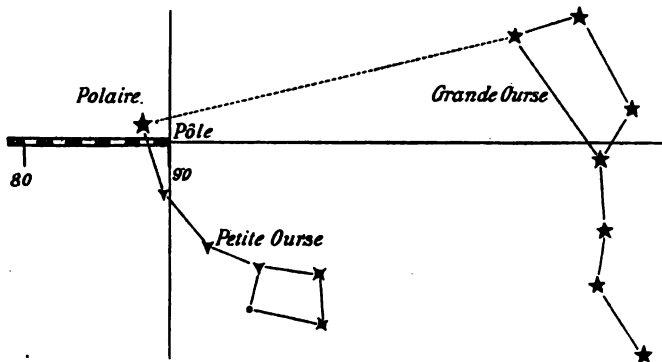
Nous avons déjà indiqué un mode de construction simple (VII, 418); on peut encore en faire une rapidement avec une aiguille à tricoter aimantée passée dans un bouchon; on traverse le bouchon dans le sens perpendiculaire par une aiguille à coudre qui sert de support; et on leste le tout au moyen d'un fil de cuivre pour descendre le centre de gravité au-dessous de la pointe.



Méridien géographique. — Sans déranger l'aiguille suspendue au fil de soie, qui sert maintenant de fil à plomb, viser un point éloigné du terrain dont on puisse relever sur la carte la déviation azimutale D par rapport au méridien géographique. Cette visée se fait en plaçant l'œil dans une position pour laquelle le fil à plomb semble se projeter juste sur le point choisi, puis en abaissant le regard le long du fil à plomb et en marquant sur le sol la trace de la ligne de visée.

L'angle A des deux droites marquées sur le sol diminué de l'angle D relevé sur la carte fait connaître la déclinaison.

Observation de l'Étoile Polaire. — On obtient une détermi-



nation très précise du méridien géographique en visant l'Étoile

Polaire dont la position par rapport au pôle est représentée par la figure et dont la distance polaire est de $1^{\circ} 13'$.

Selon la commodité des heures d'observation, on vise l'étoile soit à son passage au méridien, dont l'heure est donnée par l'*Annuaire du Bureau des Longitudes*, soit au moment de ses plus grandes *digressions*, qui ont lieu à environ 6 heures de distance des passages au méridien.

Dans ce dernier cas, la déviation azimutale de la Polaire par rapport au méridien dépend de la latitude du lieu. On trouve encore la valeur de cette déviation dans l'*Annuaire du Bureau des Longitudes*, et cette quantité se trouve être connue avec une très grande précision alors même qu'on ne saurait que très grossièrement l'heure de l'observation.

128. Intensité de la composante horizontale. Mesure de MH. — Suspendre horizontalement une aiguille à tricoter



aimantée à un fil de soie fin (*soie à dentelle dédoublée*) et la faire osciller autour du fil de suspension.

— Pour mesurer la durée des oscillations on se sert d'une montre à secondes ou d'un compteur de secondes à arrêt. On met le compteur en marche en comptant *zéro* au moment où le barreau aimanté passe par sa position d'équilibre et l'on arrête l'aiguille en comptant *dix* quand le barreau aimanté repasse par cette position après 10 oscillations complètes.

Soient T la période des oscillations dans le champ H , M le moment magnétique, m la masse de l'aiguille aimantée. On assi-

mille cette aiguille à une tige cylindrique infiniment étroite ⁽¹⁾ de longueur L , et l'on calcule MH par la formule

$$MH = \frac{\pi^2 L^2 m}{3 T^2}.$$

129. Mesure de $\frac{M}{H}$. — On détermine le rapport $\frac{M}{H}$ en mesurant la déviation que produit l'aiguille étudiée, en agissant sur un magnétomètre à aimant court. Nous avons déjà décrit le détail des expériences (VII, 124).

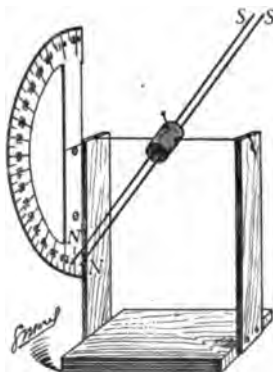
130. Variations de la composante horizontale du champ terrestre. — Transporter le *magnétomètre* (VII, 124) en différents points de la salle. L'intensité du champ terrestre en ces différents points est inversement proportionnelle au carré de la période d'oscillation propre de l'appareil.

On constatera que cette durée d'oscillation reste presque exactement la même d'un point à l'autre s'il n'y a pas de fortes pièces de fer dans le voisinage. Dans le cas contraire, les variations du champ magnétique peuvent être très importantes.

131. Inclinaison. — *Montage.* — Aimanter deux aiguilles à tricoter de faible diamètre ($l = 22\text{cm}$; $d = 0\text{cm},1$) et les enfiler parallèlement jusqu'en leur milieu dans un même bouchon de liège fin ($l = 2\text{cm}$; $d = 1\text{cm}$), les pôles de même nom du même côté.

Passer ensuite un fil de soie fin (*soie à dentelle*) au travers du bouchon, entre les deux aiguilles et bien perpendiculairement à leur direction. Pour passer le fil on se sert d'une aiguille *très fine* (n° 12) afin que le liège puisse se refermer de lui-même et fixer le fil de soie.

Préparer d'autre part un support fait de deux planchettes verticales (15cm ; 3cm ; 1cm) fixées par des vis en laiton contre une autre planche plus épaisse ($10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 2\text{cm}$).



⁽¹⁾ On pourra se dispenser de peser l'aiguille et de faire cette approximation si l'on mesure la période θ des oscillations de cette aiguille chargée de deux masses connues ($\mu = 5\sigma$) attachées à ses deux bouts à une distance l l'une de l'autre et se faisant équilibre de manière que l'aiguille reste horizontale. La formule est dans ce cas

$$MH = \frac{2\pi^2 \mu l^2}{\theta^2 - T^2}.$$

Fixer enfin un rapporteur contre l'une des planchettes verticales, son centre à la hauteur du bord supérieur de la planchette.

Réglage. — Enfoncer plus ou moins les aiguilles dans le bouchon de manière qu'en tenant le tout par le fil de soie tendu horizontalement, le système soit aussi près que possible d'être en équilibre indifférent.

Faire avec un canif, en haut des planchettes verticales, deux fentes transversales et suspendre l'aiguille aimantée par le fil de soie tendu horizontalement entre ces deux fentes. On appuiera fortement sur le fil pour qu'il pénètre dans la partie la plus serrée des fentes et qu'il s'y trouve fortement fixé.

Faire osciller l'aiguille aimantée dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique et achever d'équilibrer cette aiguille en piquant une ou deux épingles de laiton dans le bouchon. Ces petits contrepois supplémentaires doivent être réglés de façon que l'aiguille soit en équilibre dans la position verticale avec le pôle nord en bas, et que la durée de ses oscillations soit de plusieurs secondes.

Expériences. — Ayant ainsi réglé l'aiguille et ayant mesuré sa durée d'oscillation, on change l'orientation générale de l'appareil et on le fait tourner d'un quart de tour pour que l'oscillation se fasse dans le plan du méridien.

Le pôle nord s'est relevé. On place l'œil dans une position telle que la direction moyenne de l'aiguille se projette suivant un rayon du rapporteur et l'on note la position de ce rayon. On relève aussi sur ce rapporteur, à l'aide d'un fil à plomb, la position de la verticale passant par le centre. L'angle de ces deux droites est égal, en première approximation, au complément de l'*inclinaison*.

Tourner progressivement l'appareil autour de la verticale. Le pôle nord s'abaisse ⁽¹⁾, passe dans la verticale et se relève ensuite sensiblement à la même hauteur maxima quand l'appareil a fait un demi-tour.

Noter la nouvelle inclinaison.

Elle diffère en général un peu de la première valeur trouvée parce que le centre de gravité peut ne pas être juste sur la direction

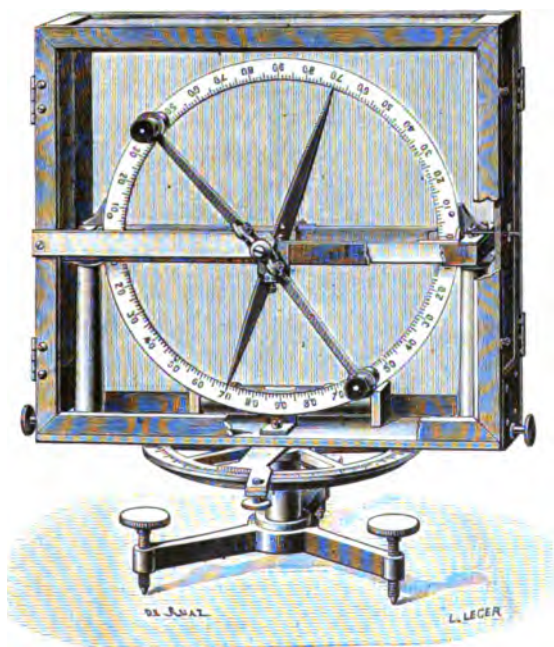
(1) On vérifiera que la *tangente* de l'inclinaison observée dans un azimut quelconque est proportionnelle au *cosinus* de l'angle que cette direction fait avec celle du méridien magnétique.

de l'aiguille et que le centre de gravité est alors successivement au-dessus et au-dessous de cette aiguille.

Des deux valeurs trouvées pour l'inclinaison, la plus petite est la plus exacte. La moyenne de ces deux valeurs correspond à ce que donnerait l'appareil si l'on ramenait exactement le centre de gravité sur l'axe magnétique de l'aiguille tout en le laissant à la même distance de l'axe de suspension.

Correction pour l'influence du poids de l'aiguille. — Faire deux nouvelles séries de mesures en dérégulant d'abord légèrement le centre de gravité, puis en le dérégulant davantage, mais en laissant ce centre de gravité sur l'axe magnétique. Cette condition sera satisfaite si l'aiguille aimantée est encore en équilibre dans la position verticale quand elle oscille dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique.

Ces expériences faites, on trace leur courbe représentative. On prend comme coordonnées les *tangentes* des inclinaisons obser-



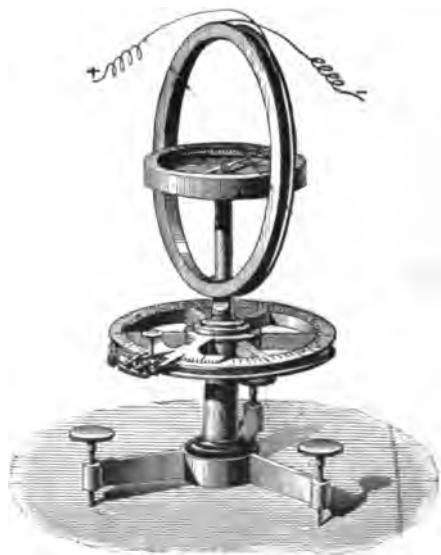
vées, et les inverses des carrés des périodes d'oscillation que possède l'aiguille quand elle oscille dans le plan perpendiculaire au méridien. Si, pour l'une des expériences, le centre de gravité était

passé de l'autre côté de l'axe de suspension, l'abscisse correspondante devrait être portée dans le sens négatif.

La courbe ainsi obtenue est une droite. Le point où elle coupe l'axe des inclinaisons donne la valeur définitive de l'inclinaison, corrigée de l'influence du poids de l'aiguille.

— Les mesures sont un peu plus précises quand on se sert d'une *boussole d'inclinaison* comme celle que représente la figure (page 301). Avec un tel appareil la correction que nous venons d'étudier se fait en renversant le sens de l'aimantation de l'aiguille.

131 bis. Mesure du champ terrestre au moyen de la boussole des tangentes et de l'électrolyse. — *Montage.* — Si l'on ne dispose pas d'une boussole des tangentes, on peut en



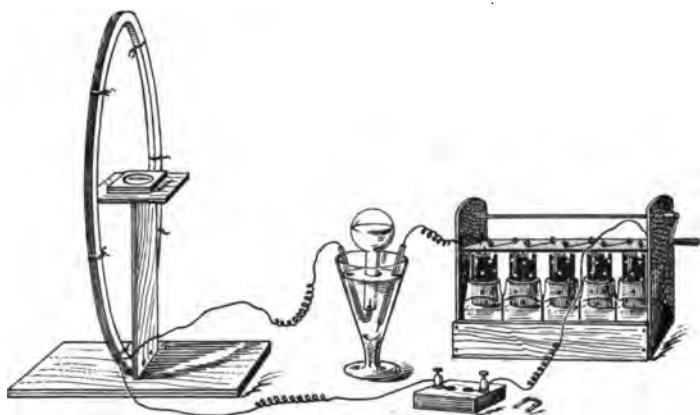
construire une avec un cerceau de bois et une boussole. Il faut seulement que l'aiguille aimantée de la boussole soit montée sur pivot avec une chape de pierre et que son cercle gradué ait environ 6^{cm} de diamètre, afin qu'on puisse déterminer la position de l'aiguille à un demi-degré près.

Prendre un cerceau ($d = 60^{\text{cm}}$) dont on arrache, s'il y a lieu, les clous en fer après les avoir remplacés par des clous en laiton. Enrouler sur la partie extérieure quatre tours de fil de cuivre isolé ($d = 0^{\text{cm}}, 1$), en les attachant au cerceau par quelques ligatures.

Fixer verticalement le cerceau contre un support en bois ($e = 2^{\text{cm}}$) disposé comme l'indique la figure et assemblé avec des vis en laiton. La planchette supérieure ($e = 1^{\text{cm}}$) se trouve à quelques millimètres en dessous du centre du cerceau.

Expériences. — Poser la boussole sur la plate-forme, au centre du cerceau. Orienter l'appareil de manière que le plan moyen des spires soit dans le plan du méridien, autrement dit de manière que l'aiguille aimantée de la boussole se place dans le plan du cerceau.

L'appareil ainsi disposé constitue une *boussole des tangentes*



qui convient pour la mesure des courants de l'ordre de 1 ou 2 ampères. Si les intensités à mesurer étaient plus petites, on augmenterait le nombre des tours de fil.

Mettre l'appareil dans le circuit d'une pile avec un voltamètre à eau acidulée et un interrupteur. Si la force électromotrice de la pile ne dépasse pas une dizaine de volts, il n'est pas nécessaire, en général, de prendre un rhéostat de réglage, car la résistance du voltamètre réduit l'intensité du courant à une valeur d'environ 1 ou 2 ampères, qui convient pour la mesure.

Les fils de communication doivent être tordus l'un sur l'autre ou tout au moins être très rapprochés pour qu'ils n'agissent pas sensiblement sur la boussole.

Si l'on se sert d'un rhéostat, il ne faut pas non plus que cet appareil puisse agir sur la boussole. Le plus sûr est alors de prendre

un rhéostat à liquide (**VII, 80**) dont le champ magnétique est manifestement très faible.

Relever la position initiale de l'aiguille aimantée. Faire passer le courant et noter à une demi-seconde près l'heure où commence l'expérience.

Pendant que le courant passe, on mesure la déviation de l'aiguille. Au bout de quelques minutes on arrête le courant en notant l'heure de la fin de l'expérience et l'on mesure, enfin, le volume de l'hydrogène dégagé dans le voltamètre.

— Pour avoir les éléments nécessaires au calcul en valeur absolue de la composante horizontale du champ terrestre, il n'y a plus qu'à mesurer le rayon moyen des spires de la boussole des tangentes. Le moyen le plus simple consiste à mesurer leur circonférence au moyen d'un *mètre* flexible avec lequel on entoure le cerceau qui porte les fils.

Sensibilité. — Il est aisé de reconnaître que, dans les expé-

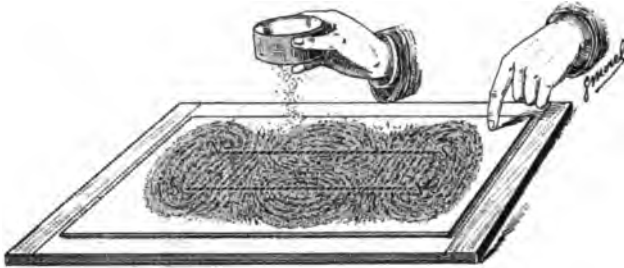


riences qui précèdent, la cause d'erreur la plus grave réside dans l'incertitude sur la valeur de la déviation. On aurait une précision bien plus grande en remplaçant la boussole à pivot par un magnétomètre à aimant court et à miroir (**VII, 124**). — Il faudrait alors ne mettre qu'un tour de fil sur la boussole ou bien employer des courants plus faibles.

LIGNES DE FORCE DU CHAMP MAGNÉTIQUE.

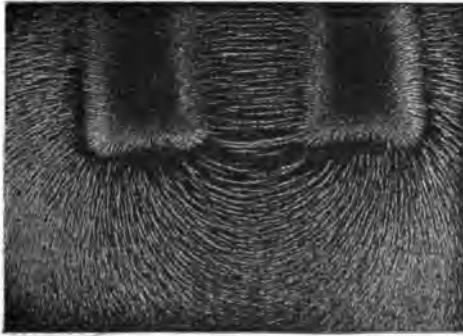
132. Spectres magnétiques. — Placer l'aimant étudié sur la table et poser par-dessus une feuille de carton blanc un peu fort ($e = 0^{\text{cm}}, 2$). Saupoudrer uniformément le carton d'une couche très légère de limaille de fer qu'on distribue avec un tamis. En frappant doucement le carton pour favoriser l'orientation des grains de limaille, on verra se dessiner les lignes de force du champ.

Pour *fixer* la figure obtenue, il suffit de projeter sur le carton,



avec un pulvérisateur (**III, 44**), un nuage d'une solution étendue de gomme laque dans l'alcool (*fixatif* pour fusains).

Bien des tours de main peuvent remplacer celui-ci. — On peint à l'avance une plaque de verre avec une solution de gomme ara-



bique; on forme le spectre sur cette lame de verre, et l'on y fixe les grains de limaille au moyen d'un jet de vapeur qu'on produit

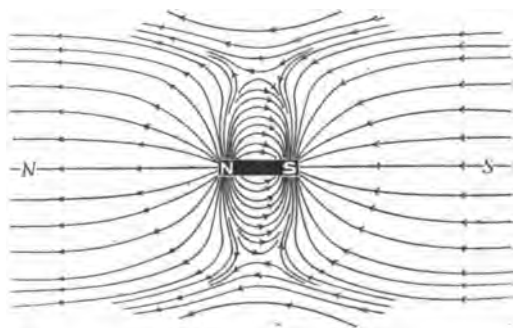
A., II.

en faisant bouillir de l'eau dans un petit ballon (64). — On peut aussi produire le spectre sur du papier paraffiné dont on refond la paraffine au moyen d'un bec Bunsen (168). — Mais le mieux est encore de faire une copie du spectre sur papier photographique (126, 213). Les papiers qui conviennent le mieux sont des papiers *demi-rapides*, qui demandent environ 1 minute d'exposition pour être impressionnés par la lumière d'une lampe de 16 bougies. L'expérience se fait dans une salle peu éclairée. On forme le spectre en projetant la limaille directement sur la feuille de papier sensible, on impressionne ce papier sensible sans le déplacer, puis on le débarrasse de la limaille et on le développe à la manière ordinaire.

C'est de cette manière qu'ont été obtenus les *spectres* reproduits dans les figures des pages 305 et 311 (échelle $\frac{2}{3}$). —

Spectres divers. — Relever le spectre magnétique d'un aimant en fer à cheval posé à plat et le spectre de cet aimant dans le plan perpendiculaire. — Prendre aussi le spectre d'un aimant rectiligne. On peut constituer cet aimant avec une aiguille à tricoter aimantée que l'on casse en deux et dont les deux moitiés sont liées ensemble, les pôles de mêmes noms côte à côte. — On prendra encore le spectre de ces deux aiguilles placées parallèlement à quelques centimètres de distance, soit dans le même sens, soit en sens inverse (*fig.* p. 305). — On constatera enfin la disparition presque complète du spectre d'un ressort de montre aimanté quand on en rapproche les deux pôles jusqu'au contact.

133. Exploration du champ avec la boussole. — Prendre une boussole de petites dimensions (4^{cm}), l'orienter de façon à



amener l'aiguille aimantée sur son repère et faire alors dans les

bords de la monture deux entailles qui matérialisent la ligne Nord-Sud passant par l'axe.

Tendre une feuille de papier sur une planche à dessin (60^{cm}; 45^{cm}) et placer au milieu de cette feuille de papier une demi-aiguille à tricoter aimantée qu'on oriente dans la direction du méridien magnétique, le pôle nord tourné vers le nord.

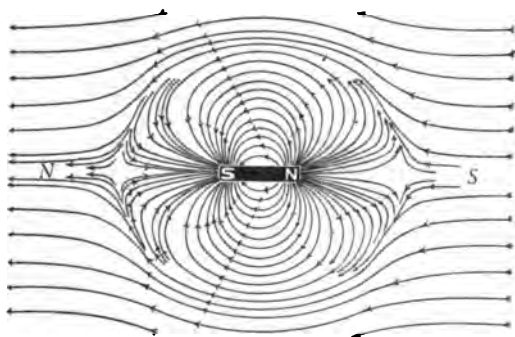
Poser la boussole en un point quelconque du papier, l'aiguille aimantée sur son repère. Marquer alors sur le papier, avec la pointe d'un crayon, la place des deux encoches de la monture. Retirer la boussole et tracer la droite joignant ces deux points : c'est la direction du champ magnétique au centre de la boussole (48; 175; 176).

Ayant ainsi tracé la direction du champ magnétique en un grand nombre de points, on dessine des courbes tangentes en chaque point à la direction trouvée : ce sont les lignes de force.

On observera que ces lignes de force sont sensiblement rectilignes et parallèles quand on les étudie à une distance un peu grande de l'aimant, mais qu'elles s'incurvent dans son voisinage, tout un groupe de lignes de forces partant de l'aimant pour y revenir.

— Répéter les expériences en retournant l'aimant fixe bout pour bout.

On obtient alors, dans le voisinage de l'aimant, une forme du champ plus complexe. On notera, en particulier, les points sin-



guliers où le champ est nul et l'on étudiera la répartition des lignes de force autour de ces points singuliers.

Pour cette dernière expérience, l'aimant doit être plus puissant que tout à l'heure. On pourra réunir en un paquet deux ou trois

aiguilles semblables à celles dont on se servait dans l'expérience précédente.

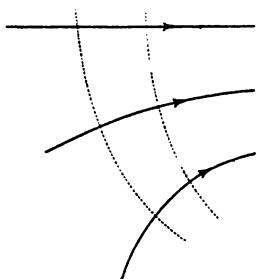
Lignes équipotentielles. — Après avoir obtenu comme précédemment un diagramme des lignes de force du champ, on trace sur le dessin des courbes coupant à angle droit ces lignes de force. Ce sont des *lignes équipotentielles*.

Tracer sur le même dessin les lignes

$$\frac{m}{r} - \frac{m}{r'} + ax = \text{constante},$$

qui correspondraient au cas de deux pôles ponctuels. Les lignes équipotentielles fournies par l'expérience sont très voisines de celles-ci (175).

Potentiel et travail. — Tracer comme nous venons de le dire quelques lignes de force et deux lignes équipotentielles qui les coupent, puis remettre l'aimant en place.



Faire alors osciller l'aiguille aimantée de la boussole en la plaçant successivement sur chacun des segments de lignes de force compris entre les deux lignes équipotentielles fixes.

On devra vérifier que le carré de la période varie proportionnellement à la longueur du segment de ligne de force correspondant (175).

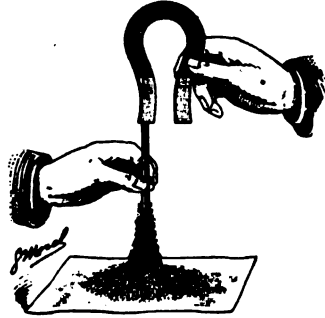
Conservation du flux de force. — Après avoir exploré le champ magnétique avec la boussole, comme nous l'avons indiqué plus haut (VII, 133), tracer deux lignes de force voisines, puis remettre l'aimant fixe et la planche à dessin dans leurs positions primitives.

Mesurer alors les périodes d'oscillation de l'aiguille aimantée en différents points le long du *tube de force*, puis relever, pour chacun de ces points, l'écartement des deux lignes de force voisines et la distance de ce point à l'axe.

Résulte-t-il de ces mesures que l'intensité du champ le long du tube de force devient d'autant plus petite que la section du tube devient plus grande? La loi de la conservation du flux se trouve-t-elle vérifiée dans les limites de l'incertitude que comporte la mesure de l'écartement des lignes de force?

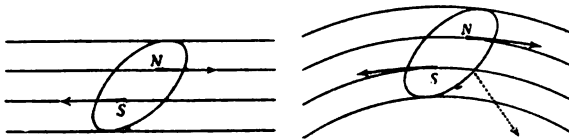
AIMANTATION DU FER ET DE L'ACIER.

134. Expériences qualitatives. — Un morceau de fer placé dans le voisinage d'un aimant ou d'un électro-aimant devient lui-même un aimant; il s'y développe des pôles que l'on peut rendre visibles avec de la limaille de fer. — Un clou non aimanté, suspendu par son milieu, s'oriente quand on approche un aimant, parce que le clou lui-même s'aimante. — Une aiguille à tricoter ou un fil de fer placés dans un solénoïde s'aimantent par le passage du courant (VII, 116). — Les grains de limaille dont on se sert pour produire les spectres magnétiques (VII, 132) s'orientent dans le champ parce qu'ils sont aimantés.



— Dans toutes ces expériences, le pôle nord créé par le champ se trouve du côté vers lequel se serait tourné le pôle nord d'une boussole placée en ce point.

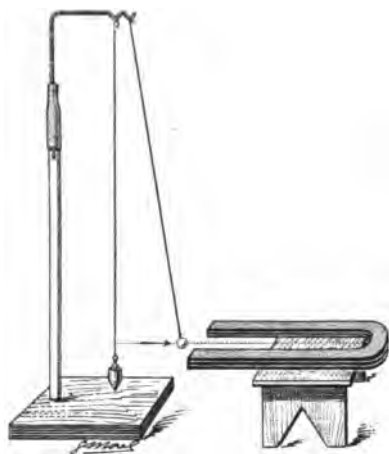
135. Force exercée par le champ sur un morceau de fer. — Si le champ était *uniforme*, les forces exercées par le champ sur le magnétisme développé dans le morceau de fer se réduiraient à un couple. Mais, si les lignes de force sont courbes, les forces exercées ont, en outre, une résultante qui est dirigée vers la concavité des lignes de force; c'est-à-dire vers la région des



champs les plus grands. C'est de ce côté que le morceau de fer se dirigera et c'est l'existence de ces forces qui rend compte du mécanisme d'après lequel l'aimant attire le fer.

— Pour montrer l'attraction vers les champs forts, on suspend une bille de bicyclette ($d = 0^{\text{cm}}, 8$) à un fil, en la faisant tenir avec un peu de cire et l'on met à côté un fil à plomb non magnétique. Si l'on approche un aimant en fer à cheval, de façon que la bille

d'acier soit dans le plan de symétrie, on voit la bille se déplacer vers l'aimant en restant dans le plan de symétrie. La bille d'acier



ne suit donc pas les lignes de force qui sont perpendiculaires à ce plan, mais *elle avance vers les champs forts*.

— On rencontre cette même propriété dans l'expérience du *spectre magnétique* (VII, 132). Si l'on imprime des secousses un peu fortes et un peu prolongées à la limaille, toute cette limaille finit par se rassembler au voisinage des arêtes de l'aimant, là où le champ est maximum.

— De même, quand on aimante une aiguille à tricoter avec un solénoïde (VII, 116), au moment où l'on envoie le courant, l'aiguille est comme aspirée par le solénoïde et elle se précipite vers la région centrale où le champ est le plus intense.

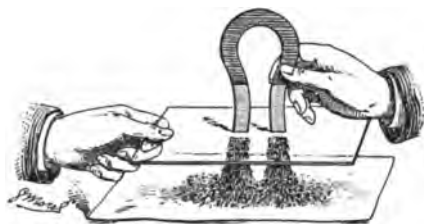
— Il est intéressant d'étudier la manière dont varie la force exercée sur une bille d'acier placée successivement en des points différents de la surface d'un aimant, mais l'interprétation de l'expérience n'est pas très simple.

L'expérience se fait en mesurant l'effort nécessaire pour arracher la bille d'acier. On se sert pour ces mesures d'une balance à fléau non magnétique.

136. Écrans non magnétiques et écrans magnétiques.

— Un aimant attire la limaille ou les menus objets de fer ou d'acier aussi bien à travers le bois, le verre ou les métaux non magnétiques qu'à travers l'air. — L'attraction est, au contraire, insigni-

fiant à travers une lame de tôle ($e = 0^{\text{cm}}, 1$). — Si l'on met contre les pôles d'un aimant une *armature* de fer ou même une simple



lame de tôle de fer ($e = 0^{\text{cm}}, 1$), cette armature s'aimante, crée un champ de sens contraire à celui que produisait l'aimant et les effets magnétiques sont beaucoup diminués en arrière de l'armature. Muni de son armature, l'aimant agit encore sur la boussole, mais il n'agit plus sensiblement sur de la limaille de fer ou sur des petits clous placés derrière l'armature.

— On rend l'effet d'écran magnétique très visible au moyen des spectres magnétiques.

Tout d'abord, on constatera que l'on ne peut, pour ainsi dire, pas trouver le spectre magnétique d'un aimant en fer à cheval quand on le recouvre d'une feuille de tôle posée à plat.

Si, ensuite, on pose en travers de la ligne des pôles de l'aimant



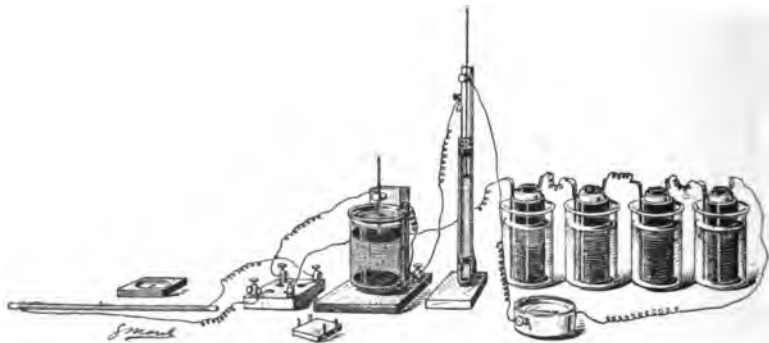
une plaque de fer ($10^{\text{cm}}; 2^{\text{cm}}; 0^{\text{cm}}, 4$), et si l'on forme le spectre magnétique de l'ensemble, on voit des lignes de force partir de la partie libre de l'aimant et se diriger vers la plaque de fer, où elles arrivent normalement. A l'intérieur du contour de cette lame, la trace des pôles de l'aimant a disparu.

La figure (p. 311) représente le cas où la plaque de fer est placée en avant des pôles de l'aimant (175).

137. Courbes d'aimantation. Expériences magnétométriques. — *Montage.* — Préparer un solénoïde magnétisant formé d'une couche de fil de cuivre ($d = 0^{\text{cm}}, 04$) isolé à la soie et enroulé en spires contiguës sur presque toute la longueur d'un tube de verre ($l = 30^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 7$). Le fil de cuivre est arrêté aux deux bouts du tube en liant un groupe de plusieurs spires avec de la ficelle fine fortement serrée sur le verre.

Ce solénoïde ne peut supporter que des courants de deux ou trois ampères. Comme il a environ 20 spires par centimètre, il ne peut donc créer que des champs atteignant 50 ou 75 unités C.G.S. Mais cette valeur est assez grande pour permettre d'étudier la partie la plus intéressante des courbes d'aimantation.

La résistance du solénoïde est d'environ 3 ohms. Pour l'actionner



il suffit donc de disposer d'une force électromotrice d'environ 8 volts (quatre accumulateurs).

On met ce solénoïde dans le circuit de la pile avec un ampère-mètre, un rhéostat à liquide et un inverseur de courant.

L'inverseur de courant est un interrupteur à quatre godets de mercure (**VII, 62**) dans lequel les communications sont établies au moyen de deux fils de cuivre courbés en forme de \sqcap . Ces fils peuvent être fixés sur les côtés d'une planchette, comme l'indique la figure et l'on établit alors d'un seul coup toutes les communications, soit dans un sens, soit dans l'autre (103).

On se sert de deux rhéostats à sulfate de cuivre montés en série, l'un est fait avec un tube d'environ 3^{cm} de diamètre et l'autre est formé d'un vase deux ou trois fois plus large.

L'ampèremètre, de 0 à 2 ampères, doit être à graduation sensiblement équidistante dans toute l'échelle et avoir eu son zéro récemment rectifié pour que l'on puisse avoir la valeur des courants avec quelque précision à partir de quelques centièmes d'ampère (¹). Cet ampèremètre doit être placé aussi loin que possible de la boussole pour qu'il ne modifie pas le champ magnétique dans lequel se trouve cet appareil.

Expériences. — Poser le solénoïde sur la table en l'orientant dans la direction Est-Ouest, et le fixer avec de l'arcanson (I, 55). Placer une boussole à quelques centimètres au nord du milieu du tube et la fixer aussi sur la table.

Placer à l'intérieur du solénoïde un fil de fer ($l = 20^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{mm}}, 1$) que l'on a redressé en l'étirant fortement, et que l'on a ensuite recuit au rouge sombre.

Si ce recuit a été fait quand le fil de fer était perpendiculaire au méridien magnétique, et si le fil de fer a été placé immédiatement dans le solénoïde, il est très peu aimanté et n'agit presque pas sur l'aiguille de la boussole. Il faut cependant le désaimanter. On envoie donc dans le solénoïde un courant très faible d'un sens tel que l'effet sur la boussole diminue et même commence à changer de signe. On augmente ce courant jusqu'à ce qu'il soit juste assez fort pour qu'en le supprimant l'aiguille de la boussole revienne au zéro : le fil de fer est alors désaimanté.

Courbe de première aimantation. — Le fil de fer étant en place et désaimanté, envoyer dans le solénoïde un courant de l'ordre des centièmes d'ampère et noter la déviation de la boussole en même temps que l'intensité du courant.

Faire croître ensuite le courant jusqu'à 1 ou 2 ampères, en l'augmentant progressivement par l'action des rhéostats, mais sans jamais couper le circuit.

Construire la courbe représentant les *tangentes* des déviations de la boussole en fonction de l'intensité du courant. On notera le

(¹) On pourra se servir d'un ampèremètre à cadre mobile (VII, 161). — On peut aussi mesurer l'intensité du courant au moyen d'un galvanomètre. Le courant principal passe dans un fil de manganine ($d = 0^{\text{mm}}, 05$; $l = 15^{\text{cm}}$) et l'on met en dérivation sur ce fil le galvanomètre et une boîte de résistance. En faisant varier cette résistance, on change à volonté la sensibilité et l'on mesure aussi bien des courants de l'ordre du centième d'ampère que des courants de l'ordre de l'ampère.

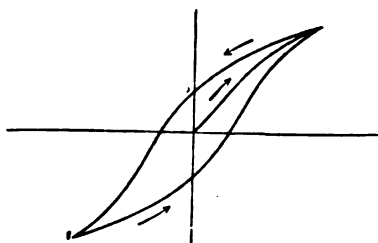
début presque rectiligne de la courbe, sa montée brusque et son deuxième coude suivi d'une montée très lente.

Magnétisme résiduel. — Diminuer progressivement le courant et le supprimer complètement. Le fil de fer est resté aimanté et la courbe représentative n'est presque pas descendue.

Force coercitive. — Changer maintenant le sens du courant et employer des courants croissants, jusqu'à ce que l'action sur l'aiguille aimantée ait disparu. Le champ négatif qu'il a fallu créer mesure la *force coercitive* du fil de fer.

Cycles d'hystérésis. — Continuer l'action du dernier courant employé, en augmentant son intensité jusqu'au maximum. Faire ensuite décroître le courant jusqu'à zéro, changer encore son sens et le faire croître de nouveau jusqu'au maximum.

On construira la courbe cyclique et l'on déterminera l'aire



embrassée par cette courbe (II, 16). Cette surface mesure l'énergie dissipée dans le fer pendant le cycle d'hystérésis.

Répéter ces expériences pour des courants maxima de moins en moins intenses. Les courbes cycliques auront des formes semblables et seront renfermées les unes dans les autres.

— Tracer aussi les courbes cycliques correspondant à des variations d'intensité du courant sans changements de sens.

Correction pour l'action du solénoïde. — Enlever le fil de fer et faire passer un courant de 1 ou 2 ampères dans le solénoïde magnétisant. Le solénoïde agit très faiblement sur la boussole et produit une déviation proportionnelle au courant.

La correction qu'il pourrait y avoir lieu de faire consisterait à diminuer la *tangente* de chacune des déviations observées dans les expériences précédentes de la *tangente* de la déviation que donne le courant correspondant quand il passe dans le solénoïde

sans fer. La précision des expériences nécessite-t-elle que l'on fasse cette correction?

Valeurs absolues. — Pour chacune des expériences, on connaît la valeur du champ magnétisant, car si le solénoïde contient N tours de fil par centimètre et si l'intensité du courant est de A ampères, le champ magnétisant vaut

$$0,4 \cdot \pi NA$$

Pour pouvoir déduire des mesures la valeur du *moment magnétique* de la tige de fer ou d'acier, il suffira de connaître la composante horizontale du champ terrestre (**VII, 128**) et de mesurer la distance du centre de la boussole au milieu de la tige aimantée ainsi que la longueur de cette tige.

Pour calculer ensuite l'*intensité d'aimantation* comme quotient du moment magnétique par le volume, on peut assimiler la tige de fer à un cylindre et mesurer son diamètre avec le *palmer* ou le *calibre à coulisse* (**II, 13**).

On évaluera aussi l'*induction magnétique* ($B = H + 4\pi I$) pour différents points de la courbe de première aimantation et les valeurs correspondantes de la perméabilité magnétique ($\mu = \frac{B}{H}$).

Comparaison des propriétés du fer et de l'acier. — Les expériences précédentes seront faites successivement avec du fer doux (fil de fer recuit) et avec de l'acier trempé (aiguille à tricoter).

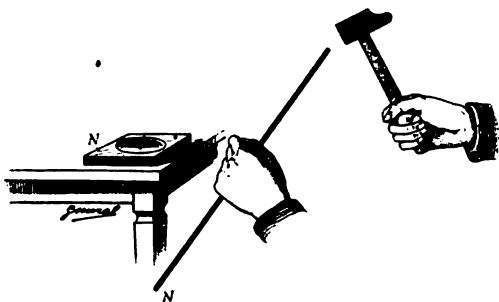
On constatera que le *fer garde plus de magnétisme résiduel que l'acier*, mais que ce magnétisme résiduel disparaît, dans le fer, pour un champ négatif plus faible que celui qui est nécessaire pour désaimanter l'acier trempé.

138. Disparition de l'hystérésis. — *Action des chocs et aimantation par le champ terrestre.* — Prendre une tige de fer ($l = 100\text{cm}$; $d = 0\text{cm}, 7$), la tenir à la main en l'inclinant dans le méridien magnétique suivant la direction même du champ terrestre et frapper fortement avec un marteau sur l'extrémité de la tige.

Étudier ensuite le magnétisme de cette tige de fer en l'approchant de la boussole. Un pôle nord s'est développé à l'extrémité qui était tournée vers le nord.

Si l'on retourne la tige de fer bout à bout et si l'on répète l'expérience, on obtient des pôles qui sont inversés par rapport à la tige de fer, mais qui restent semblablement placés par rapport au champ terrestre.

Continuer les expériences en frappant sur la tige de fer placée exactement dans la direction perpendiculaire au méridien magné-



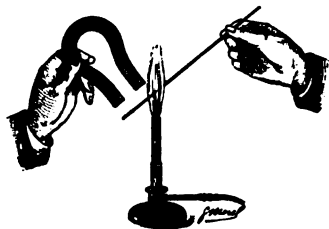
tique. En l'approchant de la boussole sans changer son orientation, on constate que l'aimantation a presque complètement disparu.

— Construire une courbe d'aimantation cyclique (**VII, 137**) avec cette tige de fer en ayant soin de frapper sur la tige de fer chaque fois que l'on change le champ magnétisant. On constate que la courbe de retour se superpose à peu près à la courbe d'aller.

Action d'une aimantation transversale alternative. — Prendre une aiguille à tricoter ($d = 0^{\text{cm}}, 15$) fortement aimantée et la placer dans une direction perpendiculaire au champ terrestre.

Envoyer dans l'aiguille un courant alternatif d'une dizaine d'ampères, puis essayer les propriétés magnétiques de l'aiguille. Son aimantation a beaucoup diminué; elle agit encore légèrement sur la boussole, mais elle n'attire plus sensiblement la limaille de fer.

139. Transformation réversible du fer au rouge. —



Prendre une aiguille à tricoter aimantée et la chauffer au rouge. L'aimantation disparaît à peu près complètement.

— Lorsqu'une tige de fer ou d'acier est chauffée au rouge, elle n'est plus sensiblement attirée par l'aimant. En se refroidissant, le fer

reprend ses propriétés magnétiques à la température même où le magnétisme avait disparu.

Un clou suspendu à un fil métallique et chauffé au rouge n'est pas attiré par un fort aimant; si on laisse le clou se refroidir, il se

précipite sur l'aimant au moment où il atteint la température de transformation (38, 77).

140. Aciers au nickel. — Avec les *aciers au nickel* contenant plus de 25 pour 100 de nickel, on a encore une transformation réversible. La température d'inversion, qui est toujours au-dessous du rouge, dépend de la teneur en nickel. Pour une teneur de 25 à 30 pour 100 l'inversion a lieu au-dessous de 100°.

Avec un acier au nickel contenant moins de 25 pour 100 de nickel, la disparition du magnétisme a lieu à une température d'autant plus basse que la teneur en nickel est plus grande. Mais la transformation est irréversible. Si l'on refroidit l'acier, il reste non magnétique, jusqu'à une température qui peut être voisine de la température ambiante pour un alliage à environ 20 pour 100 de nickel, mais qui descend bien au-dessous de 0° pour les alliages contenant près de 25 pour 100 de nickel. L'écart entre les deux températures de transformation diminue, naturellement, jusqu'à zéro, en même temps que la teneur en nickel, puisque le fer sans nickel est *réversible* (68).

MESURE DES CHAMPS MAGNÉTIQUES INTENSES.

141. Emploi de la balance. — *Montage.* — L'action d'un champ magnétique intense sur un courant un peu fort se mesure aisément avec la balance (36). Une petite balance de Roberval ($F = 500^g$) de construction soignée donne le demi-décigramme; elle suffit donc pour ces expériences.

Préparer un cadre de bois mince (20^m ; 3^m ; $0^m, 6$), pratiquer aux quatre coins des entailles dans l'épaisseur du bois et enrouler sur ce cadre 40 tours de fil de cuivre isolé à la soie ($d = 0^m, 03$), en laissant les bouts libres du fil assez longs (60^m).

Fixer cette bobine plate perpendiculairement à l'extrémité d'une baguette de sapin (50^m ; 1^m ; $0^m, 4$), en faisant, par exemple, pénétrer l'extrémité arrondie de la baguette dans un trou pratiqué vers l'un des bouts du cadre.

Visser la baguette en son milieu sur une planchette (6^m ; 6^m ; 1^m), et mettre à l'autre bout un morceau de bois de mêmes dimensions pour faire contrepoids à la bobine.

Poser la balance sur un support (caisse en bois, $h = 15^m$) et

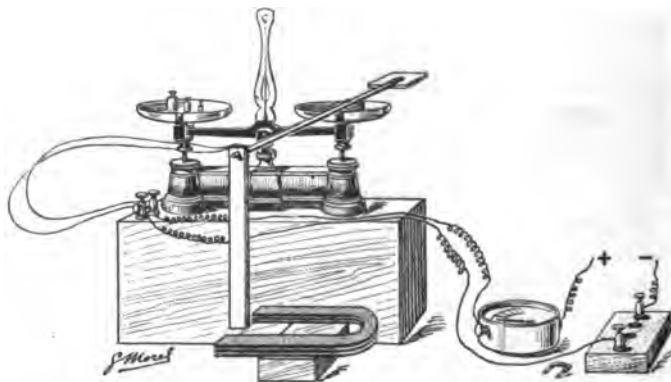
mettre l'appareil sur l'un des plateaux, la bobine plate bien verticale. Visser deux bornes dans le support et y fixer les bouts libres du fil de cuivre fin en leur laissant toute leur longueur (60^{cm}), de façon qu'ils agissent le moins possible sur la balance.

Sensibilité. — L'intensité du courant que l'on envoie dans la bobine ne doit pas dépasser 2,5 ampères ou 3 ampères. Comme la résistance du fil est d'environ 3 ohms, la pile peut n'avoir qu'une force électromotrice de 6 volts (3 accumulateurs).

Avec un courant de 3 ampères, la force exercée par le champ magnétique atteint un *gramme* dès que le champ magnétique atteint environ 25 unités C.G.S. La *valeur absolue* du champ, supposé horizontal, se déduit immédiatement de la mesure de cette force.

Expériences. — Équilibrer la balance. Placer le bord inférieur de la bobine au point du champ magnétique que l'on étudie, et faire passer le courant. Mesurer alors l'intensité de ce courant avec un ampèremètre, et rétablir l'équilibre avec des poids marqués.

Champ d'un aimant. — Étudier avec cet appareil la distribution du champ magnétique dans un aimant en fer à cheval un



peu gros. Constaté que le champ est maximum dans l'entrefer et au voisinage des pôles, qu'il varie assez peu dans toute l'étendue de l'entrefer, et qu'il diminue, au contraire, extrêmement vite à l'extérieur de l'aimant. On construira la courbe représentant les variations du champ le long de l'axe.

— Dans ces expériences on a d'abord donné à l'aimant une orientation telle que les lignes de force soient horizontales et per-

pendiculaires au petit côté de la bobine exploratrice, qui est l'élément actif.

Quand on aura déterminé la région où le champ varie peu, on y placera le petit côté de la bobine exploratrice. Faisant alors tourner l'aimant autour de la verticale de ce point, on étudiera les variations de la force mesurée par la balance en fonction de l'angle dont l'aimant aura tourné.

On devra trouver que la courbe représentative est une *sinusoïde*, puisque la force exercée est proportionnelle à la composante normale du champ.

— Fermer ensuite incomplètement le circuit magnétique de l'aimant en ménageant entre les pôles et l'armature de fer doux un *entrefer* juste assez grand pour permettre le passage de l'appareil de mesure.

Vérifier que le champ est maintenant à peu près exclusivement concentré dans l'entrefer et qu'il est beaucoup plus intense que dans les premières expériences.

— Fermer, enfin, complètement le circuit magnétique de l'aimant au moyen de l'armature et constater que le champ magnétique a considérablement diminué.

Champ d'un électro-aimant. — Étudier de la même façon le champ magnétique d'un électro-aimant (**VII, 143**) d'abord sans armature, puis avec son armature en circuit magnétique fermé.

Répéter enfin les expériences en laissant un entrefer d'épaisseur déterminée qu'on réalise au moyen de cales de bois d'épaisseur connue (1^{cm}) placées entre l'électro-aimant et l'armature.

Avec un entrefer de 1^{cm} d'épaisseur, il est rare que les bobines de l'électro-aimant soient assez fortes pour que l'on puisse atteindre la saturation magnétique du noyau. On vérifiera que, si l'on fait alors varier le courant magnétisant, on obtient dans l'entrefer une intensité de champ magnétique proportionnelle à l'intensité de courant correspondante.

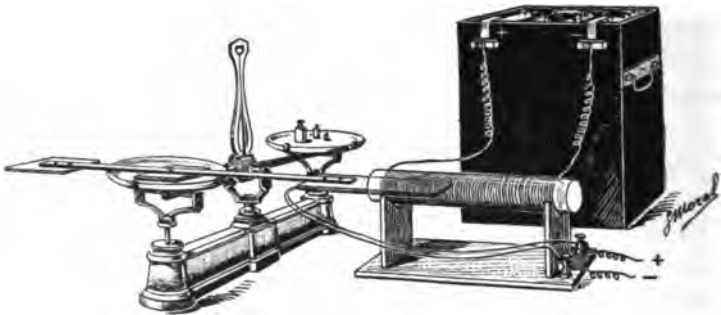
— On vérifiera encore qu'avec un même courant magnétisant, le champ dans l'entrefer varie à peu près en raison inverse de l'épaisseur de cet entrefer.

Champ d'un solénoïde. — Pour ces expériences, le solénoïde et la bobine exploratrice sont placés horizontalement, comme le représente la figure. Le solénoïde peut être construit en enroulant

une ou deux couches de fil ($d = 0^{\text{cm}}, 1$) autour d'un verre de lampe cylindrique ($d = 5^{\text{cm}}$).

Avec des courants de 4 et de 8 ampères, qui peuvent être fournis par 4 accumulateurs, on constatera que le champ dans le solénoïde est proportionnel à l'intensité du courant qui le produit.

On constatera aussi que le champ est sensiblement uniforme à l'intérieur, bien qu'il décroisse à partir du centre. Cette décrois-



sance qui est très lente tant qu'on n'est pas sorti du solénoïde devient très rapide dès qu'on a dépassé l'extrémité de l'enroulement.

A l'extérieur des spires, le champ est beaucoup plus faible et de sens contraire à celui qu'on vient de trouver à l'intérieur.

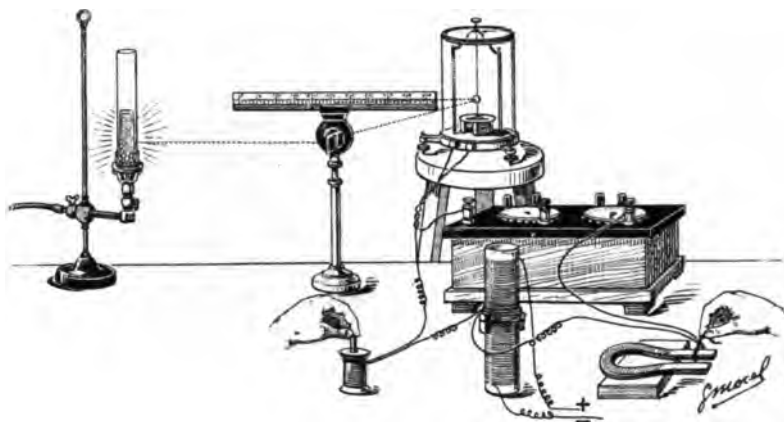
142. Emploi des phénomènes d'induction. — *Montage.* — On se propose de mesurer le champ d'un électro-aimant ou d'un aimant en recueillant dans un galvanomètre le courant induit dans une bobine que l'on retire brusquement du champ magnétique.

Préparer une bobine exploratrice faite de quelques dizaines de tours de fil de cuivre enroulés en spires d'un diamètre un peu plus grand que la largeur des pôles de l'aimant. Mettre cette bobine dans le circuit d'un galvanomètre avec une boîte de résistances destinée à régler la sensibilité. Mettre aussi dans le circuit un amortisseur constitué par une bobine de quelques tours de fil dans laquelle on peut déplacer à la main un petit aimant pour envoyer dans le galvanomètre des courants induits auxiliaires destinés à arrêter les oscillations.

Si l'on veut obtenir la valeur absolue des champs mesurés, on mettra encore dans le circuit quelques tours de fil enroulés autour

du milieu d'un solénoïde de dimensions connues, comme celui qui nous a servi dans l'expérience précédente.

On évitera de choisir un galvanomètre de grande résistance. Un galvanomètre de Nobili d'une résistance de un ou deux ohms



observé par réflexion suffit, par exemple, pour étudier le champ d'une aiguille à tricoter aimantée (106 bis).

Si l'on emploie un galvanomètre à aimant mobile, cet instrument devra être placé aussi loin que possible des aimants que l'on étudie, et l'on devra éviter de bouger ces aimants s'ils sont encore assez près pour agir sur le galvanomètre (1).

Si l'on emploie un galvanomètre à cadre mobile, ces précautions sont inutiles. De plus on n'a pas besoin d'amortisseur; l'arrêt des oscillations s'obtient en mettant le galvanomètre en court-circuit. Il convient, par contre, de laisser toujours dans le circuit une résistance assez forte pour que le galvanomètre oscille franchement. On ne peut pas se servir de certains galvanomètres dont les cadres sont bobinés sur un anneau de cuivre rouge, puisqu'ils sont aperiodiques même en circuit ouvert.

Les connexions seront faites avec des fils doublés, le fil de retour tordu avec le fil d'aller, afin que le circuit ne puisse être traversé

(1) L'aimant, le solénoïde ou l'électro-aimant doivent, tout au moins, avoir une orientation telle qu'ils ne fassent pas dévier le galvanomètre. Dans cette position, le champ très faible créé dans le galvanomètre s'ajoute bien au champ terrestre, mais il en modifie peu la valeur et ne fausse pas sensiblement les impulsions que l'on mesure.

par un flux magnétique variable que dans les enroulements qui servent à mesurer le champ.

Expériences. — Placer la bobine exploratrice près d'un pôle de l'aimant, amortir les oscillations du galvanomètre et retirer brusquement cette bobine (1). On observe au galvanomètre une impulsion et l'on mesure la déviation maxima de l'oscillation qui se produit.

— Étudier tout d'abord la loi suivant laquelle cette déviation augmente quand on diminue la résistance du circuit. La déviation doit varier en raison inverse de la résistance totale. Régler alors cette résistance de manière que l'impulsion soit facile à mesurer.

— Répéter l'expérience en remettant la bobine exploratrice à la même place mais dans différentes orientations. Les déviations obtenues ont un maximum et peuvent changer de sens. Elles sont proportionnelles à la projection de la *force magnétique* sur la perpendiculaire au plan des spires. — On construira la courbe représentative.

— Mesurer de la même façon les impulsions qui se produisent quand on arrache la bobine exploratrice des différents points du champ. Ces impulsions mesurent les valeurs du flux magnétique qui passe au travers de la bobine dans chacune de ses positions. On construira la courbe représentant les variations de la force magnétique le long de l'axe.

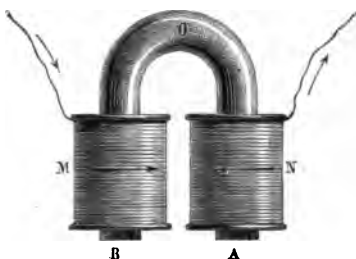
Valeurs absolues. — Pour étalonner l'appareil, on envoie un courant de quelques ampères dans le solénoïde de dimensions connues qui agit par induction sur le circuit du galvanomètre. L'impulsion du galvanomètre peut être mesurée à l'établissement ou à la rupture du courant, ou bien quand on arrache l'enroulement disposé autour du milieu du solénoïde. Quel que soit le procédé employé, cette impulsion doit toujours avoir la même valeur. Elle mesure le flux magnétique qui traverse cet enroulement et dont la *valeur absolue* est connue si l'on a mesuré l'intensité du courant qui traverse le solénoïde.

La valeur des flux observés dans les autres expériences se déduit de cette mesure par une simple proportion.

(1) Le mouvement de la bobine devrait être infiniment rapide. En pratique, tant qu'il ne s'agit que de petites rotations des organes mobiles, il suffit que le déplacement de la bobine soit terminé avant que la déviation du galvanomètre ait atteint une fraction notable de l'élongation maxima.

ÉTUDE D'UN ÉLECTRO-AIMANT.

143. Construction. — Voici un exemple d'électro-aimant assez puissant. Le noyau de fer forgé AOB a un diamètre de 4^{cm}, 5 et une longueur totale de 45^{cm}, avec un écartement des deux branches de 10^{cm} d'axe en axe; il pèse environ 5^{kg}. Les bobines M, N, longues de 11^{cm} et larges de 8^{cm}, portent chacune environ 500 tours de fil isolé au coton ayant 0^{cm}, 15 de diamètre; soit un poids total de fil de 3^{kg}.



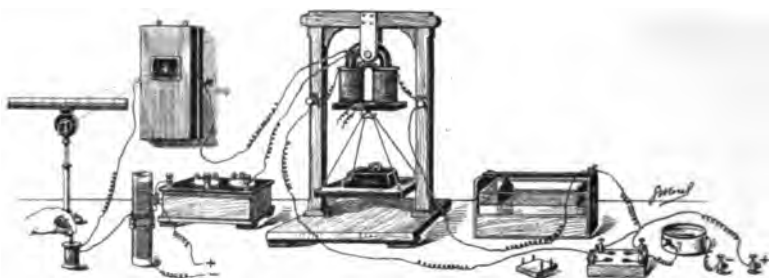
Le courant maximum que l'on peut envoyer dans l'appareil, pour une expérience de courte durée, est d'une quinzaine d'am-pères. Comme la résistance totale est voisine de 2 ohms, la force électromotrice nécessaire est alors d'une quinzaine de volts pour chaque bobine.

Avec ce courant maximum on développe une force magnéto-motrice totale d'environ 20 000 unités C. G. S. Si le circuit magnétique est ouvert, la force magnétique moyenne entre A et B peut donc dépasser 1000 unités C. G. S. Avec une *armature* (15^{cm} × 5^{cm} × 2^{cm}) qui laisse un entrefer de 1^{cm} d'épaisseur devant chaque pôle, le champ, dans cet entrefer, peut s'approcher de 10 000 unités C. G. S. Si l'on fermait complètement le circuit magnétique avec cette armature, l'induction magnétique, dans tout le fer, s'approcherait de 20 000 unités pour le courant maximum. La force nécessaire pour arracher l'armature (force portante) $\left(F = 2 \cdot S \frac{B^2 - H^2}{8\pi} \right)$ serait alors bien supérieure à 100^{kg}.

144. Mesure des flux magnétiques par les phénomènes d'induction. — *Montage.* — Mettre l'électro-aimant dans le circuit des piles ou de la batterie d'accumulateurs, avec un rhéostat à liquide (VII, 80) et un commutateur (VII, 137 ou 168). Placer en outre un ampèremètre dans la portion du circuit où le courant ne change pas de sens.

Disposer des enroulements d'une vingtaine de tours de fil de cuivre isolé ($d = 0^{\text{cm}}, 05$) autour du milieu O du noyau de fer doux.

ainsi qu'autour des pôles A et B et autour du milieu de l'armature. Enrouler aussi 20 tours de ce fil autour d'une plaque de bois



($e = 0^{\text{cm}}, \delta$) ayant le diamètre du noyau de fer, et qui servira de bobine exploratrice.

Ces enroulements pourront être placés dans le circuit d'un galvanomètre avec une boîte de résistances et un amortisseur, comme nous l'avons expliqué à propos de la mesure des champs magnétiques (**VII, 142**). Ici encore on étalonne le galvanomètre en mesurant avec les mêmes appareils le flux créé dans un solénoïde de dimensions connues où l'on envoie un courant dont on mesure l'intensité.

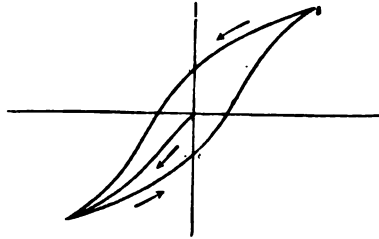
Courbes d'aimantation. — Fermer complètement le circuit magnétique avec l'armature de fer doux. Quand on fera passer le courant, le fer prendra une aimantation à peu près uniforme. On étudiera cette aimantation en mesurant les variations du flux traversant l'un des enroulements qui entourent le noyau de fer.

Commencer par désaimanter le fer en faisant passer dans les bobines des courants d'abord très intenses, puis de plus en plus faibles, dont on changera deux ou trois fois le sens à chaque réduction d'intensité.

Envoyer ensuite dans l'appareil un courant égal à environ $\frac{1}{3}$ du courant maximum et mesurer la déviation que le courant induit produit dans le galvanomètre. *Sans arrêter le courant magnétisant*, augmenter ensuite brusquement son intensité d'une quantité à peu près égale, puis l'augmenter encore et continuer à l'augmenter par bonds successifs de façon à atteindre le maximum en quatre ou cinq fois, en mesurant à chaque fois le courant induit.

Chacune des impulsions du galvanomètre est proportionnelle à l'accroissement correspondant du flux. En faisant la somme des

impulsions déjà acquises, on pourra donc construire la courbe représentant les valeurs successives du flux magnétique en fonction du courant magnétisant. A l'échelle près, c'est la courbe de première aimantation déjà rencontrée (**VII, 137**) pour laquelle



on aurait pris comme coordonnées l'*induction magnétique* B et la *force magnétique* H.

— Le fait, qui est d'une observation immédiate, que cette courbe n'est pas rectiligne, montre qu'il n'y a pas lieu de définir des *coefficients d'induction mutuelle* entre des circuits enroulés sur un noyau de fer (**VII, 168**).

— Faisant décroître le courant, le supprimant et le changeant de signe, on étudiera successivement le magnétisme résiduel et la force coercitive; et l'on construira des courbes cycliques d'amplitudes variables, comme nous avons été conduits à le faire par une autre méthode (**VII, 137**).

On remarquera en particulier que le noyau de fer reste très fortement aimanté quand on supprime le champ, mais qu'il suffit d'un champ négatif très faible pour le désaimanter.

Champ démagnétisant. — Si on laisse un entrefer, même de quelques millimètres seulement, l'électro-aimant ne reste plus sensiblement aimanté quand le courant est supprimé. Le champ magnétique créé par les pôles qui apparaissent alors dans la coupure, et qui est de sens contraire au champ magnétisant primitif, suffit, en effet, pour faire disparaître presque toute l'aimantation.

Champ dans l'entrefer. — Fuites magnétiques. — Aimanter l'électro-aimant avec un courant dont on a d'abord changé deux ou trois fois le signe sans changer sa valeur, de façon à obtenir un phénomène cyclique.

Mesurer les impulsions que l'on obtient par inversion du courant quand on utilise l'un après l'autre les différents enroulements ré-

partis sur le trajet du flux magnétique, et comparer les valeurs correspondantes de l'induction magnétique.

Comment le flux magnétique se répartit-il? Passe-t-il tout entier dans l'entrefer? Quelle est la valeur du champ dans l'entrefer? Peut-on tracer une figure donnant la représentation des *fuites magnétiques*?

— Répéter la mesure du champ dans l'entrefer pour différentes épaisseurs de l'entrefer et pour différentes valeurs du courant.

Ce n'est que pour les électro-aimants très puissants que l'on peut arriver à saturer les pièces polaires. Aussi trouve-t-on le plus souvent, dans l'entrefer, un champ qui est à peu près proportionnel au courant magnétisant, et en raison inverse de l'épaisseur de l'entrefer.

La quasi-proportionnalité que nous rencontrons ici nous montre que la notion de coefficients d'induction conserve un sens à *peu près* défini, malgré la présence du fer (**VII, 168**) dans le cas où, comme ici, le fer reste toujours loin de la saturation.

145. Force portante. — Dans cette dernière série de mesures, déterminer à chaque fois quel poids on doit suspendre à l'armature pour équilibrer l'attraction magnétique.

Construire la courbe ayant pour coordonnées la force portante et le carré de l'induction magnétique dans l'entrefer. Comparer avec la courbe $F = 2 S \frac{B^2 - H^2}{8\pi}$ qui correspondrait à un entrefer dont le diamètre serait très grand par rapport à son épaisseur. Peut-on négliger H^2 devant B^2 ? La formule représente-t-elle bien les expériences?

— Glisser dans les entrefers deux rondelles de fer d'un diamètre connu et plus petit que le diamètre du noyau des bobines. Laisser se fermer le circuit magnétique en permettant à l'armature d'appliquer ces rondelles contre le noyau de fer quand on aimante modérément l'électro-aimant.

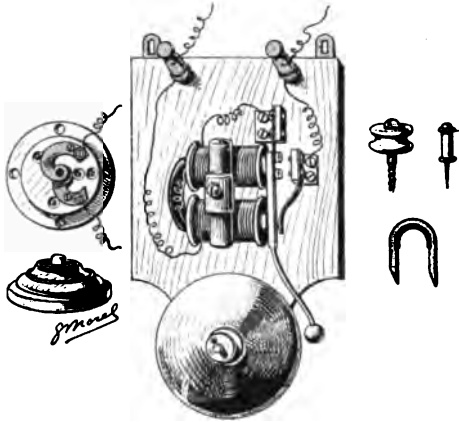
Avec ce montage, le flux magnétique passe presque tout entier dans les pièces polaires, l'induction magnétique doit donc y varier en raison inverse de leur surface.

Faire alors des mesures de force portante avec un même courant magnétisant, mais pour des surfaces de contact variables. La force portante croît-elle en raison inverse de la surface tant que les petites rondelles de fer ne sont pas assez petites pour être saturées?

APPLICATIONS DES ÉLECTRO-AIMANTS.

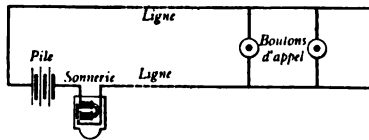
146. Sonneries. — *On ne saurait trop recommander de n'acheter que de l'appareillage électrique de très bonne qualité. Toutes les pièces doivent être très robustes et très solidement vissées.*

La résistance des bobines d'une sonnerie est, en général, de quelques ohms. On l'actionne avec une batterie de deux ou trois



éléments Leclanché montés en tension (**VII, 96**) qui suffit largement pour une longueur de ligne ne dépassant pas une centaine de mètres.

La ligne doit être isolée avec soin. On prend du fil de $0^{\text{cm}},09$ isolé à la gutta et au coton et on le fixe le long des murs, soit sur

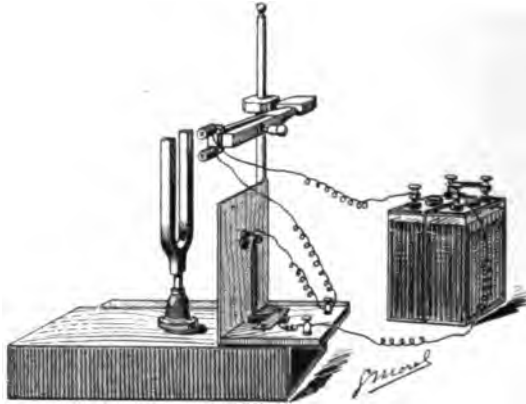


des poulies de porcelaine, soit sur des clous isoloirs, soit avec des cavaliers munis de fibre.

— Si l'on veut que la sonnerie ne sonne qu'un seul coup par appel, on modifie les connexions de façon que le courant arrive directement à l'électro-aimant, sans passer par le ressort interrupteur.

147. Entretien électrique d'un diapason. — On peut entretenir les vibrations d'un diapason au moyen d'un électro-aimant et d'un microphone (*M. Guillet*).

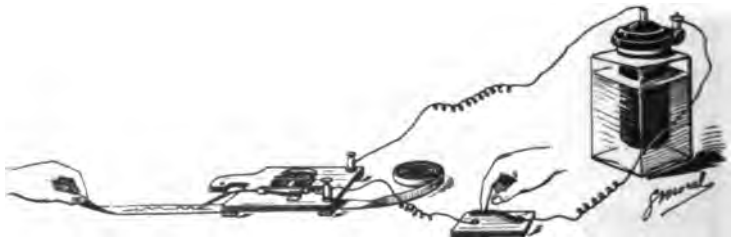
Prendre l'électro-aimant d'une sonnerie et le fixer sur un support près de l'une des branches du diapason. Poser un microphone de construction sommaire (**VII, 150**) sur la caisse de résonance.



Mettre, enfin, l'électro-aimant et le microphone dans le circuit d'une pile un peu plus forte que celle qui actionne d'ordinaire la sonnerie.

L'appareil étant ainsi disposé, si l'on ébranle le diapason par un choc, il continue à vibrer indéfiniment, car son mouvement est entretenu par les courants microphoniques qu'il règle lui-même (3).

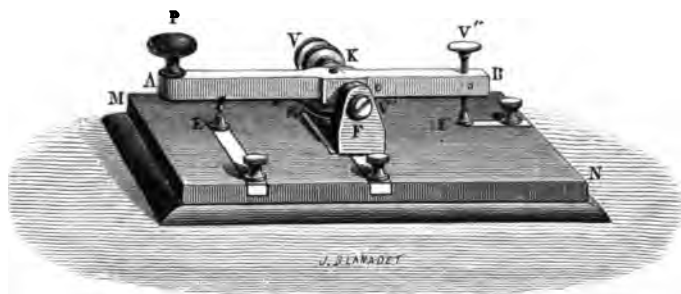
148. Principe du télégraphe. — Retirer le timbre d'une



sonnerie électrique. Retirer aussi le marteau et le remplacer par une plume fixée à la tige du marteau. Tourner cette tige vers le socle qui aura été échancré pour permettre à la plume de passer. Faire ainsi affleurer la plume sur la table.

Mettre de l'encre sur la plume et passer en dessous une bande de papier qu'on déplace lentement. La plume laisse sur le papier une trace qui est continue tant qu'il ne passe pas de courant dans l'électro-aimant.

La sonnerie est montée en appel à un coup (VII, 146) dans un circuit contenant la pile et un interrupteur. A chaque éta-



blissement du courant, la trace laissée par la plume présente une encoche dont la longueur est réglée par la durée du contact. Une combinaison de signaux longs et courts correspond à chaque lettre suivant un alphabet conventionnel (126).

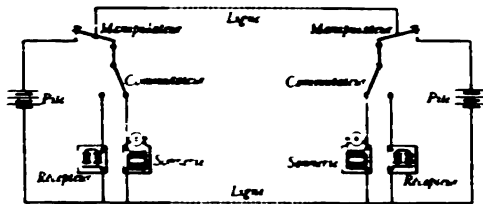
Alphabet Morse.

A	— —	N	— —	É	— — — —
B	— — — —	O	— — — —	0	— — — — — —
C	— — — — —	P	— — — — —	1	— — — — — — —
D	— — —	Q	— — — — —	2	— — — — — — —
E	—	R	— — —	3	— — — — — —
F	— — — —	S	— — —	4	— — — — — — —
G	— — — — —	T	—	5	— — — — —
H	— — — —	U	— — — —	6	— — — — —
I	— —	V	— — — —	7	— — — — — —
J	— — — — —	W	— — — —	8	— — — — — — —
K	— — — —	X	— — — — —	9	— — — — — — —
L	— — — — —	Y	— — — — — —		
M	— — — —	Z	— — — — — —		

— Le montage d'une ligne télégraphique à deux postes pour télégraphe Morse se fait suivant le diagramme suivant (p. 330).

Dans leur position de repos, le commutateur et le manipulateur

ne laissent que la sonnerie sur la ligne. A l'appel de la station qui veut transmettre un message, le télégraphiste du poste appelé met le récepteur en circuit par le jeu du commutateur.



149. Principe du téléphone. — *Électro-aimant polarisé.* — Enrouler une cinquantaine de tours de fil isolé ($d = 0^{\text{m}}, 05$) sur l'un des pôles d'un aimant en fer à cheval un peu fort et enrouler aussi une cinquantaine de tours du même fil sur l'autre pôle, mais en sens inverse. Ce double enroulement sera placé avec un commutateur (**VII, 137** ou **168**) dans le circuit d'un élément Leclanché.

Poser une boussole sur la table et faire dévier fortement l'aiguille aimantée en approchant l'aimant en fer à cheval.

Les appareils étant ainsi disposés, on constate que le passage du courant modifie la déviation de l'aiguille aimantée et que cette action change de sens avec le sens du courant.

En graduant le courant, on vérifiera en outre que l'effet qu'il produit est sensiblement proportionnel à son intensité. Dans un électro-aimant non polarisé, au contraire, les forces développées sont indépendantes du sens du courant (**VII, 145**).

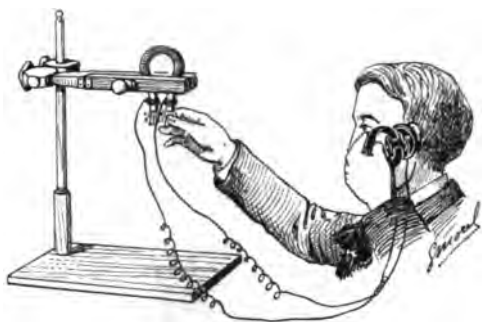
Induction par variations de perméabilité ⁽¹⁾. — Préparer encore un électro-aimant polarisé, comme dans l'expérience précédente et le mettre dans le circuit d'un galvanomètre balistique (**VII, 62** ou **164**).

Approcher l'armature de l'aimant, puis la laisser se coller et l'arracher ensuite. Tous ces mouvements seront suivis par le galvanomètre.

— Remplacer le galvanomètre balistique par un récepteur téléphonique de *faible résistance*. Toutes les variations brusques de la perméabilité magnétique se traduisent alors par un bruit dans le téléphone.

(¹) Voir aussi les expériences sur l'induction (**VII, 171** et **172**).

Au lieu de manœuvrer l'armature on pourra accrocher une poignée de petits clous aux pôles de l'aimant. On *entendra* dans le téléphone tous les mouvements qu'on fera subir à ces clous.



150. Principe du microphone. — Prendre un crayon de charbon ($d = 0^{\text{cm}}, 7$; $l = 10^{\text{cm}}$) et le tailler en pointe à ses deux bouts en se servant d'une grosse lime ou d'une meule en grès. Couper aussi deux morceaux de charbon un peu plus gros et d'inégales longueurs ($d = 1^{\text{cm}}$; $l = 3^{\text{cm}}$ et 10^{cm}). Creuser une petite cavité dans chacun d'eux à environ 1^{cm} du bout, en se servant, par exemple, de la pointe d'une lime tiers-point.

Se procurer d'autre part une planchette de bon sapin très mince (20^{cm} ; 10^{cm} ; $0^{\text{cm}}, 4$) et la visser contre un bloc de bois (15^{cm} ; 10^{cm} ; 2^{cm}).



Le charbon à deux pointes est placé verticalement, entre les deux autres charbons. Les pointes sont seulement entrées dans les cavités qui servent de guides, le charbon vertical remue librement dans ces cavités, et il ne doit pas subir de pression.

L'un des charbons fixes est maintenu contre la planchette vibrante, soit avec de la colle forte, soit avec un mastic fusible, après qu'on y a attaché un fil de cuivre pour la prise de courant ($l = 40^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 05$). L'autre charbon est pressé contre la base du support en même temps qu'un fil de cuivre, au moyen d'une plaque de bois (8^{cm} ; 3^{cm} ; $0^{\text{cm}}, 5$) tenue par deux vis.

On peut aussi fixer les deux charbons à la planchette vibrante

en les entrant dans des trous qui aient juste le diamètre de ces charbons.

Expériences. — Mettre le microphone dans le circuit d'une pile de quelques volts avec un récepteur téléphonique de faible résistance et écouter dans ce récepteur. On entend des sons irréguliers dus aux vibrations inévitables que transmettent les murs et la table d'expériences. Ces sons sont éteints si l'on fait reposer le microphone sur deux tubes de caoutchouc (feuille anglaise, $D = 0^{\text{cm}}, 7$).

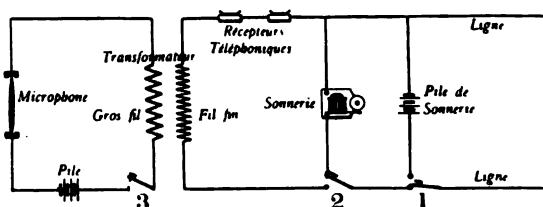
Si l'on parle alors devant la planchette vibrante, la parole est transmise au récepteur téléphonique.

— Ainsi disposé, le microphone peut être placé à une centaine de mètres du récepteur téléphonique auquel il est relié sans que la sensibilité soit notablement diminuée, pourvu que les fils de ligne ne soient pas trop fins ($d \geq 0^{\text{cm}}, 09$).

— Pour les petites distances, on peut transmettre la parole sans microphone, en se servant indifféremment du même téléphone magnétique comme *transmetteur* ou comme *récepteur*, puisque cet appareil est réversible.

— L'installation d'un poste téléphonique double comporte un microphone, des récepteurs et une sonnerie d'appel. Si la transmission se fait à grande distance, on emploie en outre un transformateur pour relever le voltage.

La figure ci-dessous ne représente qu'un seul des deux postes, dans la position d'attente. On peut appeler l'autre poste en



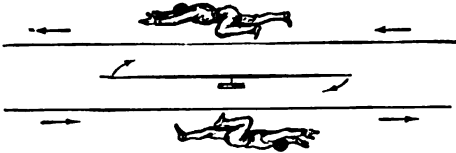
agissant sur le bouton 1.

Si l'on est appelé, au contraire, on décroche les récepteurs. Le commutateur 2 et l'interrupteur 3 fonctionnent alors automatiquement, la sonnerie est donc mise hors circuit et les récepteurs téléphoniques sont introduits dans la ligne, en même temps que le courant est envoyé dans le microphone pour permettre la transmission des sons.

CHAMP MAGNÉTIQUE D'UN COURANT.

151. Expérience fondamentale. — Se procurer une boussole ou une aiguille aimantée librement suspendue (**VII, 127**). Placer au-dessus ou au-dessous de l'aiguille aimantée un fil de cuivre ($d = 0^{\text{cm}}, 1$) tendu dans la direction Nord-Sud.

Si l'on envoie dans le fil un courant de quelques ampères,



l'aiguille aimantée dévie. Le pôle nord est poussé vers la gauche du courant. La déviation change de sens avec le courant. Elle est d'autant plus faible que le fil est plus loin et que le courant est moins intense.

— L'expérience peut être réalisée avec un courant plus faible si l'on emploie un *système astatique* (**VII, 126**). On place alors le fil où passe le courant *entre les deux aiguilles*.

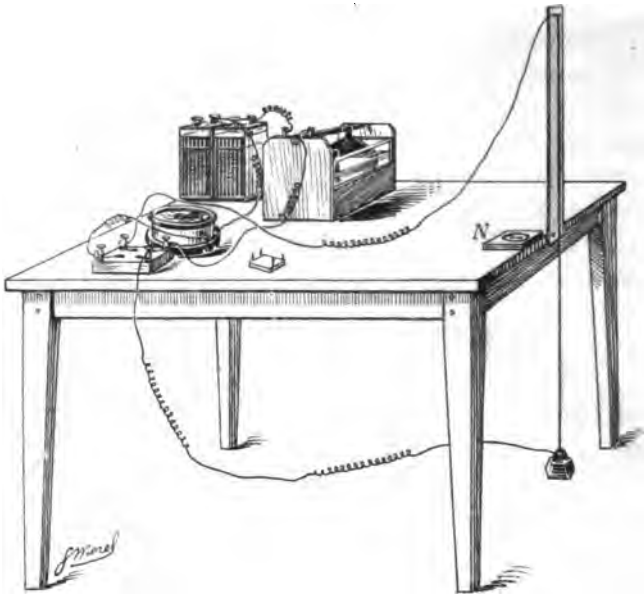
152. Champ d'un courant rectiligne. — *Montage.* — Tourner une table de manière que ses grands côtés soient dans la direction Nord-Sud. Suspendre verticalement un fil de cuivre ($l = 150^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 1$) à un support ($h = 75^{\text{cm}}$) fixé contre un petit côté de la table d'expériences, et tendre ce fil avec un poids quelconque (1^{kg}).

Placer à l'autre bout de la table une pile pouvant fournir un courant d'une dizaine d'ampères (pile Bunsen ou accumulateurs), puis un rhéostat, un ampèremètre et un commutateur. Établir les connexions comme l'indique la figure (p. 334), en éloignant le plus possible les fils de jonction du courant vertical pour que le champ magnétique puisse être considéré comme dû principalement à ce dernier conducteur.

Pour la même raison, on prendra de préférence comme ampèremètre un appareil thermique, et comme rhéostat un rhéostat à liquide.

Expériences d'oscillations. — *Loi des intensités.* — Placer une boussole sur le bord de la table, à environ 6^{cm} du fil vertical,

exactement à l'est ou à l'ouest de ce fil, et mesurer la période des oscillations de l'aiguille. Faire ensuite passer le courant et



mesurer de nouveau la période des petites oscillations sans déplacer la boussole.

On répète ces expériences pour toute l'échelle des intensités de courant dont on dispose, et on les répète encore en changeant le signe du courant.

On remarquera que l'aiguille aimantée se retourne complètement lorsque le champ du courant compense le champ terrestre. Le changement de direction se fait brusquement si la boussole a été placée exactement à l'est ou à l'ouest du fil.

Ces expériences vont établir que la force magnétique du champ créé par le courant est proportionnelle à son intensité. Or, ce champ s'ajoute algébriquement au champ terrestre, et la force magnétique du champ dans lequel l'aiguille oscille, est mesurée par l'inverse du carré de la période d'oscillation. On devra donc constater que la courbe représentant les variations de cette dernière quantité en fonction du courant se compose de deux droites qui se coupent sur l'axe des intensités et qui sont également inclinées sur cet axe.

Loi des distances. — Mesurer la période des oscillations de

l'aiguille aimantée pour une même intensité de courant, mais en plaçant la boussole à différentes distances du fil, soit dans la direction de l'Est, soit dans la direction de l'Ouest.

Ici encore le retournement de la boussole se produit au moment de la compensation du champ terrestre, la période des oscillations étant alors très grande.

Construire la courbe ayant pour coordonnées l'inverse du carré de la durée d'oscillation et l'inverse de la distance du fil au centre de la boussole. Cette courbe se compose encore de deux parties qui se coupent sur l'axe des distances, et qui sont sensiblement rectilignes pour les faibles distances.

La force magnétique est perpendiculaire au courant. — Tendre le fil rectiligne horizontalement sur la table, au lieu de le placer verticalement, et placer la boussole près du fil.

Quelle que soit l'intensité du courant, la période d'oscillation de l'aiguille aimantée reste la même que lorsque le courant ne passe pas.

Expériences de déviations. — Le fil étant encore tendu verticalement, placer la boussole au nord ou au sud de ce fil, et à différentes distances.

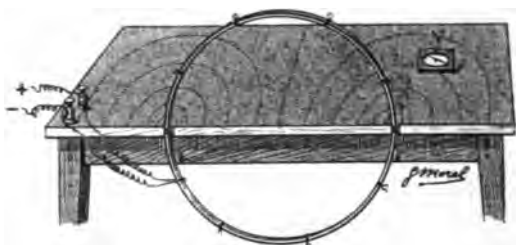
L'aiguille dévie quand le courant passe. La *tangente* de la déviation est proportionnelle au champ créé par le courant. On devra trouver que cette *tangente* varie proportionnellement à l'intensité du courant et en raison inverse de la distance au fil.

Comparaison des deux méthodes. — Les mesures de déviations comme les mesures d'oscillations permettent de trouver le rapport du champ terrestre et du champ créé par le courant à la distance où l'on opère. On vérifiera que les deux méthodes fournissent une même valeur pour ce rapport.

153. Champ d'un courant circulaire. — Attacher quelques tours de fil isolé ($d = 0^{\text{cm}}, 09$) sur un cerceau de bois ($d = 60^{\text{cm}}$) dont les clous en fer ont été remplacés par des clous en laiton. Fixer ce cercle verticalement au moyen de deux vis en laiton contre le bord d'une table légère, le centre du cercle à la hauteur du plan de la table.

Direction de la force magnétique. — Placer une boussole sur la table en un point déterminé, et envoyer dans le circuit un courant de quelques ampères. En général la boussole dévie. Mais, en tournant progressivement la table, on peut trouver une position

telle que le passage du courant ne modifie pas la direction de l'aiguille aimantée. Marquer alors sur la table la direction de l'aiguille aimantée : c'est la direction du champ magnétique du courant.



— On reportera sur un diagramme les directions du champ relevées en différents points, et l'on tracera les *lignes de force*. Ces lignes de force, sensiblement circulaires au voisinage du courant, sont toutes des lignes fermées qui entourent ce courant, à l'exception de la ligne de force centrale, qui est rectiligne.

Intensité du champ. — Pour avoir le rapport de l'intensité du champ du courant et de l'intensité du champ terrestre, il suffit, comme dans les expériences précédentes, de mesurer la période des oscillations de la boussole quand le courant passe et quand il ne passe pas.

On peut aussi faire tourner la table d'un angle droit, qu'on repère avec la boussole, et déterminer la *déviatio*n produite par le passage du courant. Au cours de cette dernière expérience, ayant tourné la table d'un angle moindre qu'un angle droit, on vérifiera que pour une même intensité de courant le *sinus* de la déviation observée est proportionnel au *sinus* de la différence entre l'angle dont la table a tourné et l'angle dont le courant fait dévier l'aiguille aimantée.

En employant l'un ou l'autre de ces deux procédés, on étudiera les valeurs de la force magnétique aux différents points du champ en conservant la même valeur du courant. On constatera en particulier que cette force magnétique varie extrêmement peu au voisinage du centre, ce point correspondant à un *maximum* pour les déplacements suivant l'axe, et à un *minimum* pour les déplacements dans le plan du cercle.

— Disposer concentriquement contre le bord de la table deux bobines circulaires de diamètres différents, et vérifier que pour

un même courant le champ au centre est inversement proportionnel au rayon du cercle enveloppé par le courant.

— Étudier les variations de l'intensité du champ magnétique en un même point en fonction de la valeur du courant; ces deux quantités sont exactement proportionnelles.

— Il est encore très facile de vérifier que pour une même intensité le champ produit est proportionnel au nombre des *ampères-tours* du fil. Il suffit pour cela d'avoir enroulé 4 tours de fil en deux parties, l'une de 3 tours, l'autre d'un seul tour. On envoie le courant dans les 4 tours de fil, et l'on mesure un champ magnétique. On fait passer ensuite le courant en sens inverse dans les deux parties de l'enroulement et l'on doit trouver un champ magnétique exactement moitié du précédent (165, 175, 176).

154. Champ d'une bobine agissant à grande distance.

— Ce champ est identique au champ que créerait l'aimant équivalent. Les lois numériques de la distribution du champ sont donc les suivantes :

1° En un point déterminé la force magnétique est proportionnelle au nombre des *ampères-tours* de l'enroulement;

2° Pour une même distance et pour des directions différentes, la projection de la force magnétique sur cette direction est proportionnelle au *cosinus* de l'angle que fait la direction considérée avec l'*axe* du courant;

3° La composante perpendiculaire de la force magnétique est proportionnelle au *sinus* du même angle, mais avec un coefficient deux fois plus petit;

4° A des distances différentes, la projection de la force magnétique sur une même direction varie en raison inverse du *cube* de la distance, dès que cette distance est un peu grande par rapport aux dimensions de la bobine.

— Ces lois seront établies expérimentalement en mesurant les déviations d'un magnétomètre à miroir, comme nous l'avons fait pour les aimants (VII, 124).

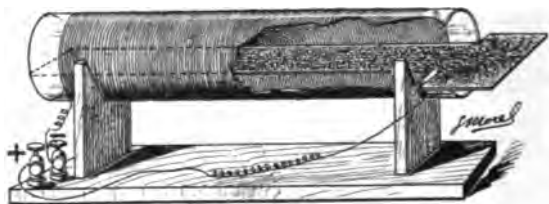
Les expériences se font facilement, soit avec une bobine plate (1) d'une dizaine de centimètres de diamètre, faite d'une quarantaine

(1) La bobine peut être construite sans cadre. On plante quatre clous dans une planche et l'on enroule le fil autour. Les spires sont ensuite attachées ensemble avec du fil fortement serré.

de tours de fil ($d = 0^{\text{cm}}, 05$), soit avec un solénoïde formé d'une ou deux couches de fil de cuivre ($d = 0^{\text{cm}}, 1$) enroulées sur un tube de verre ($D = 5^{\text{cm}}$). On emploie des courants de l'ordre de l'ampère et l'on opère à des distances du magnétomètre qui sont de l'ordre du mètre (175).

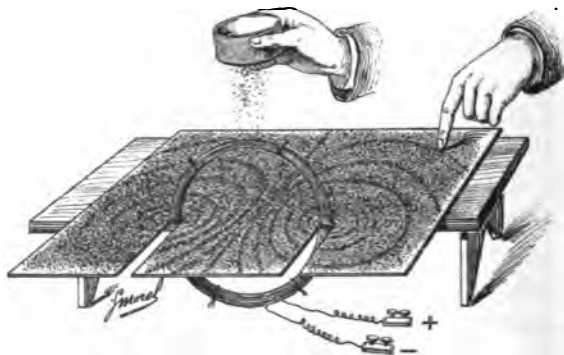
155. Spectres magnétiques. — Les expériences de spectres magnétiques (VII, 132) ne réussissent qu'avec des champs de plusieurs unités C. G. S. On peut les faire avec le courant alternatif comme avec le courant continu.

— On montre aisément le champ de la bobine plate ou du solé-



noïde qui nous ont servi dans les expériences du numéro précédent. On notera en particulier l'épanouissement des lignes de force à la sortie du solénoïde et leur repliement vers l'autre extrémité.

En plaçant le solénoïde sous une feuille de carton blanc, on



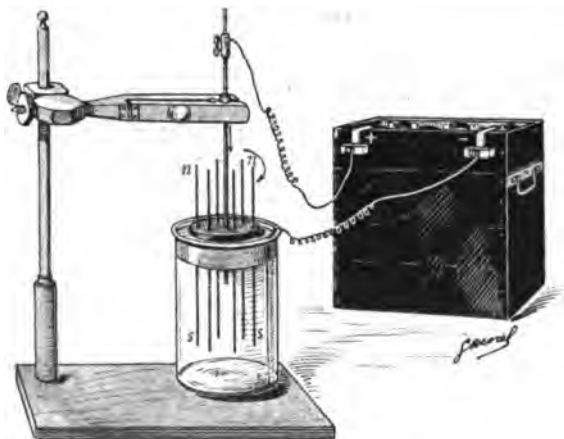
formera un spectre magnétique absolument semblable à celui que donnerait un aimant rectiligne placé dans la même position (63, 64).

— Avec la bobine plate, la limaille de fer trace d'un seul coup

l'ensemble des lignes de force dont nous avons déjà étudié la forme (VII, 153).

156. Rotation continue d'un aimant. — Les lignes de force d'un courant font le tour du fil. Un pôle d'aimant, libre de se mouvoir, pourrait donc tourner indéfiniment autour du courant sans trouver de position d'équilibre.

Pour réaliser cette expérience, il est indispensable que le circuit



puisse être coupé par l'aimant sans que le courant soit rompu. On peut satisfaire à cette condition en amenant le courant au moyen d'un conducteur liquide.

L'équipage mobile est constitué au moyen de quelques aiguilles à tricoter aimantées ($l = 15^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 2$) qui seront vernies pour qu'elles ne soient pas attaquées par la solution saline dans laquelle on va les plonger (103).

On plante ces aimants dans un disque de liège ($d = 5^{\text{cm}}$; $e = 2^{\text{cm}}$), tous les pôles de même nom d'un même côté. On perce un trou ($d = 0^{\text{cm}}, 6$) dans l'axe du disque de liège et l'on fait flotter le tout dans un vase rempli d'une solution à peu près saturée de sulfate de cuivre ($V = 500^{\text{cm}^3}$).

Le courant peut être amené au centre par une tige de cuivre ($d = 0^{\text{cm}}, 3$) qui pénètre de 1^{cm} ou 2^{cm} dans le liquide, et être repris avec une lame de cuivre (20^{cm} ; 2^{cm} ; $0^{\text{cm}}, 05$) le long du bord du vase.

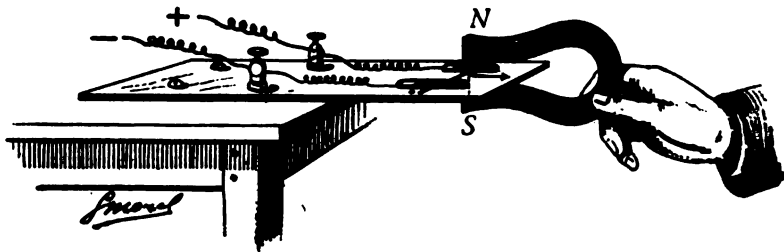
Dès que l'on fait passer dans le circuit un courant de quelques

ampères, les aimants se mettent à tourner, et ils tournent d'autant plus vite que le courant est plus intense. Le sens de la rotation change si l'on retourne les aimants ou si l'on change le sens du courant.

On augmente la vitesse de rotation de l'appareil quand on verse quelques gouttes d'éther à la surface du liquide, de façon à atténuer les phénomènes capillaires.

ACTION D'UN CHAMP MAGNÉTIQUE SUR UN COURANT.

157. Élément de courant mobile. — Creuser au ciseau, dans une planchette de sapin (20^{cm} ; 10^{cm} ; $1^{\text{cm}},5$), deux rainures parallèles (5^{cm} ; $0^{\text{cm}},5$; $0^{\text{cm}},2$) à bords très nets et distantes de 3^{cm} . Mettre dans les deux rainures du mercure *très propre* en quantité



suffisante pour obtenir des ménisques convexes. Faire flotter enfin en travers des deux rainures une bande étroite découpée dans de la tôle de fer pour plaque de téléphone (77) ou bien un fil de cuivre bien droit (5^{cm} ; $0^{\text{cm}},05$) et envoyer dans l'appareil un courant de quelques ampères.

La force exercée par le champ terrestre ou par le champ que crée le courant lui-même est en général trop faible pour vaincre les frottements; mais le fil mobile se déplace si l'on approche un aimant.

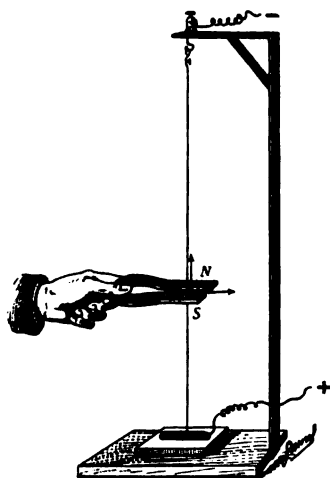
Le mouvement change de sens quand on change le sens du courant ou quand on change le sens de la force magnétique. — On n'observe aucun mouvement quand la force magnétique est parallèle au courant ou quand elle est horizontale. — L'effet maximum est obtenu, au contraire, quand la force magnétique est verticale. — On n'observe enfin aucun déplacement du fil dans sa propre direction.

Tous ces faits peuvent être résumés en disant que la force est normale au champ magnétique et au courant, et qu'il n'y a d'efficacité que la projection de la force magnétique sur la normale au courant.

— On peut donner aux deux gouttières la forme de circonférences concentriques et prolonger la tige conductrice par une lamelle de mica percée d'un trou, de manière à pouvoir l'enfiler sur une aiguille placée au centre.

Avec un courant très intense, l'équipage mobile peut alors tourner autour de l'axe sous la seule influence du champ terrestre. Si ce champ est insuffisant, on obtient une rotation rapide en approchant un pôle d'aimant (77).

Autres dispositifs. — Suspendre un fil de cuivre ($l = 50^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{mm}}$, 1) à l'un des conducteurs qui amènent le courant en terminant les deux fils en forme de crochets, que l'on aura soin



d'amalgamer (I, 54). Amalgamer aussi l'extrémité libre du fil suspendu et la faire plonger dans une rigole contenant du mercure. Si l'on envoie dans l'appareil un courant d'environ un ampère, le fil dévient sous l'action du moindre aimant (31, 103).

— Si l'on place une lampe à incandescence, dans un champ magnétique, le filament fléchit à droite ou à gauche suivant le sens du courant et le sens du champ.

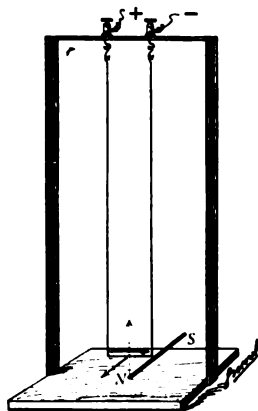
Si l'on fait passer un courant alternatif dans le filament incan-

descent ou dans la bobine qui produit le champ, les vibrations du filament rendent visibles les changements de sens du courant



alternatif. L'expérience réussit d'autant mieux que le filament est à la fois plus fin et plus long (25, 36).

— Prendre un fil de cuivre long et fin ($d = 0^{\text{cm}}, 05$), plié en forme de U (50^{cm} ; 5^{cm} ; 50^{cm}), faire deux crochets aux bouts du



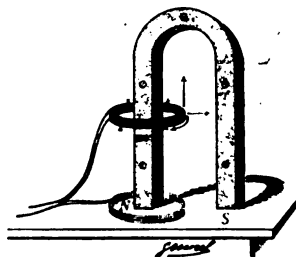
fil et le suspendre aux extrémités des conducteurs qui amènent le courant en prenant comme intermédiaire deux petits S faits du même fil. L'appareil ainsi disposé est très sensible, mais il ne met pas en évidence l'action du champ sur un seul élément de courant (47).

158. Règle du flux maximum et règle de l'aimant équivalent. — La loi élémentaire que nous venons de vérifier peut se traduire en disant que la force qui s'exerce sur le courant tend à le déplacer de façon qu'il soit traversé par le plus grand flux possible.

On peut dire aussi que le champ exerce sur le courant les mêmes forces que celles qu'il exercerait sur l'aimant équivalent.

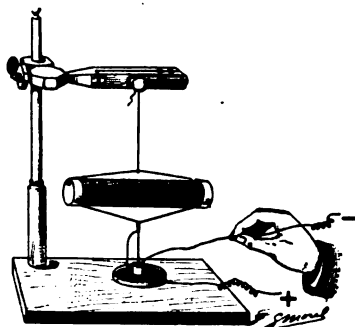
Voici quelques expériences qui sont assez frappantes et qui s'interprètent très simplement, soit avec l'une, soit avec l'autre de ces deux règles.

— Prendre une bobine plate ($D = 15^{\text{cm}}$) d'une quarantaine de tours de fil ($d = 0^{\text{cm}}, 05$) et la relier au circuit par des fils fins et longs ($l = 100^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 05$). Poser la bobine à plat sur la table et mettre debout sur cette table un fort aimant en fer à cheval (section $4^{\text{cm}} \times 5^{\text{cm}}$), en plaçant l'un de ses pôles dans la bobine.



Si l'on envoie dans la bobine un courant de quelques ampères de sens convenable, on la voit brusquement grimper le long de l'aimant pour aller embrasser le flux maximum qui est au milieu.

— En laissant pendre la bobine au bout des fils qui la relient au circuit, on réussit cette expérience d'attraction avec des courants



plus faibles et un aimant bien moins puissant. Si l'on change le sens du courant alors que la bobine a été *aspirée* par l'aimant, cette bobine est vivement repoussée; on la voit partir, se retourner, et revenir s'embrocher sur l'aimant (47, 103).

— On obtient un appareil qui s'oriente sous l'action du champ terrestre en suspendant cette même bobine à un fil de soie très fin et en faisant les prises de courant dans des godets de mercure comme nous allons l'indiquer.

L'appareil serait encore plus sensible si l'on utilisait la même quantité de fil pour faire une bobine plate de plus grand rayon ($D = 30^{\text{cm}}$).

L'expérience est des plus frappantes quand on la fait avec un solénoïde. Le solénoïde se conduit comme une aiguille aimantée; et un courant de quelques ampères est suffisant pour obtenir l'orientation dans le champ terrestre, avec un solénoïde formé d'une ou deux couches de fil de cuivre ($d = 0^{\text{cm}}, 1$) enroulé sur un verre de lampe ($D = 5^{\text{cm}}$).

Les prises de courant se font dans des vases concentriques placés en dessous et contenant du mercure (*fig.* p. 343). Ces vases peuvent être un couvercle de boîte ($D = 7^{\text{cm}}$) et un pot en faïence ($V = 15^{\text{cm}^3}$). On peut aussi creuser une cavité cylindrique et une cavité annulaire concentriques dans une même plaque de chêne, et établir les connexions au moyen de fils de fer passant dans l'épaisseur du bois (5, 77, 83, 103, 175).

— Prendre un fil de cuivre assez fin ($l = 200^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 02$), le poser sur la table sans le tendre, et y faire passer un courant de quelques ampères, aussi fort que le fil pourra le supporter.

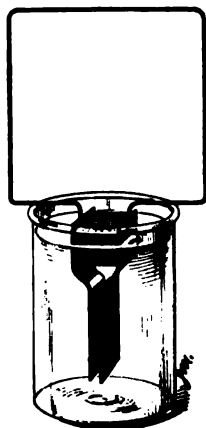


Si l'on approche un fort aimant, on voit le fil s'enrouler autour de l'aimant comme pour embrasser le plus de flux possible. L'enroulement se fait indifféremment autour de l'un ou l'autre pôle, mais dans des sens différents.

Le fil s'enroule plus facilement si on le tient à la main en le laissant pendre verticalement, et si l'on descend la main à mesure que le fil s'enroule (87).

159. Pile flottante. — Préparer une lame de cuivre et une lame de zinc amalgamé (20^{cm} ; 5^{cm} ; $0^{\text{cm}}, 1$) et leur souder des fils de cuivre ($l = 20^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 1$). Clouer ces lames vis-à-vis l'une de l'autre contre un bloc de bois (5^{cm} ; 5^{cm} ; 5^{cm}) et les ramener, en dessous, à une distance d'environ 1^{cm} .

Faire flotter cet appareil dans un vase ($d > 8^{\text{cm}}$) contenant de l'eau additionnée du tiers de son poids d'acide sulfurique, et fermer le circuit de la pile flottante en formant un cadre avec les deux fils de cuivre. Comme la résistance totale du circuit n'est que



d'une fraction d'ohm, le courant qui passe dans le cadre peut atteindre plusieurs ampères, et l'appareil est assez sensible pour s'orienter sous l'action d'un aimant assez faible (126).

L'appareil s'oriente tout juste dans le champ terrestre si l'on prend pour circuit extérieur de la pile flottante une circonférence d'assez grandes dimensions ($D = 35^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 1$).

160. Rotation continue. — Verser une solution saturée de sulfate de cuivre ($h = 2^{\text{cm}}$) dans un cristalliseur ($D = 20^{\text{cm}}$). Amener le courant au centre du vase au moyen d'une plaque de cuivre ($D = 3^{\text{cm}}$) et le reprendre sur toute la périphérie au moyen d'une électrode circulaire (lame de cuivre 65^{cm} ; 2^{cm} ; $0^{\text{cm}}, 05$). Enrouler, d'autre part, une quarantaine de tours de fil ($d > 0^{\text{cm}}, 05$) autour du cristalliseur.



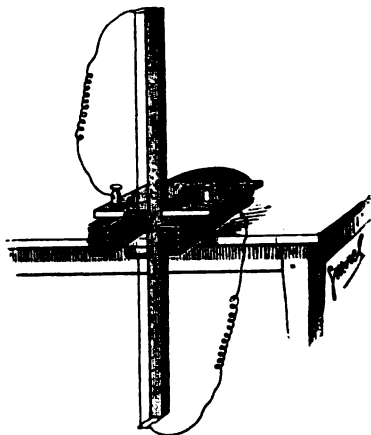
Si l'on envoie un courant de quelques ampères, tant dans l'électrolyte que dans la bobine magnétisante, le liquide se met à tourner autour de l'axe du cristalliseur. La vitesse de rotation croît avec l'intensité des courants et change de sens en même temps que chacun de ces courants.

Si l'on supprime le courant magnétisant, et si l'on place le cris-

tallissoir au-dessus de l'un des pôles d'un aimant, la rotation se produit encore, dans un sens ou dans un autre, suivant le sens du courant et suivant le pôle que l'on utilise.

161. Galvanomètre à cadre mobile. — *Montage.* —

Enrouler une centaine de tours de fil isolé à la soie ($d = 0^{\text{cm}}, 025$) sur une planchette rectangulaire ($7^{\text{cm}}; 4^{\text{cm}}; 1^{\text{cm}}$). Lier fortement les spires de fil de façon à constituer un cadre rigide. Dégager ensuite le cadre de la carcasse qui le porte. Cette carcasse aura pu être faite en deux ou trois pièces pour faciliter le démontage; on peut aussi la briser d'un coup de marteau.



Préparer, d'autre part, un support en bois analogue à celui que représente la figure et clouer deux lames métalliques ($6^{\text{cm}}; 1^{\text{cm}}, 5;$

$0^{\text{cm}}, 1$) aux extrémités de la baguette verticale ($75^{\text{cm}}; 3^{\text{cm}}; 2^{\text{cm}}$).

Souder sur le bord de ces lames les extrémités des fils libres du cadre mobile, en ayant soin de fixer solidement ces fils au milieu des petits côtés du cadre par un nœud bien serré. Souder aussi sur ces lames des fils de cuivre aboutissant à deux bornes fixées sur la partie horizontale du support ($15^{\text{cm}} \times 15^{\text{cm}} \times 2^{\text{cm}}$).

L'appareil est posé sur un fort aimant en fer à cheval, le cadre mobile parallèle aux lignes de force du champ magnétique.

Pour faire les mesures, on munit le galvanomètre d'un miroir, et l'on opère par réflexion. — On peut aussi fixer à l'équipage mobile un long index, brin de paille ou fil d'aluminium ($l = 50^{\text{cm}}; d = 0^{\text{cm}}, 7$), dont on suit les déplacements sur une règle graduée ou sur un rapporteur placé sur la table.

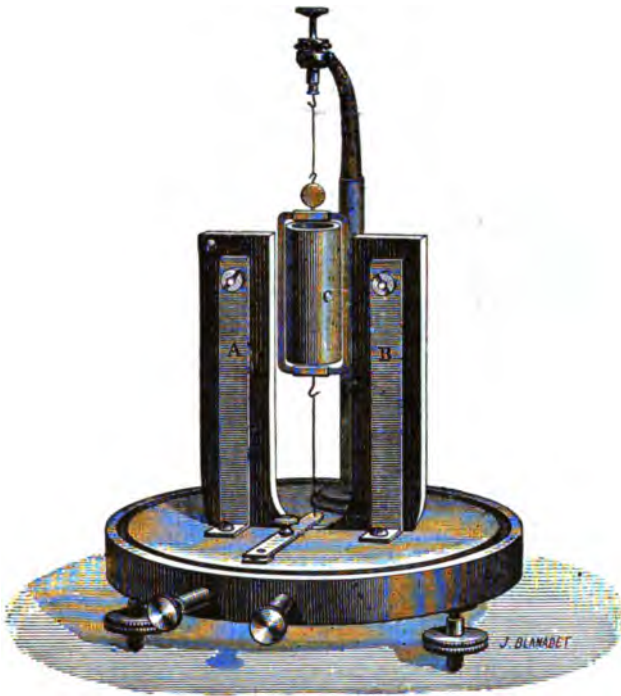
— Construit comme nous venons de le dire, l'appareil a une résistance de quelques ohms et il est sensible au dix-millième d'ampère.

Expériences. — Mettre ce galvanomètre et une boussole des tangentes dans le même circuit et vérifier la proportionnalité des indications des deux appareils.

La boussole des tangentes que nous avons décrite (VII, 131) ne

serait pas assez sensible pour être associée avec ce galvanomètre.

On pourra rendre les sensibilités comparables, soit en réduisant à 20^{cm} le diamètre de la boussole des tangentes et en lui faisant



porter un enroulement d'une centaine de tours de fil, soit en construisant le galvanomètre avec du fil plus gros ($d = 0^{\text{cm}},05$), le cadre mobile n'ayant qu'une dizaine de tours⁽¹⁾.

162. Électrodynamomètre. — *Montage.* — Comme dans les expériences précédentes, l'organe mobile est encore un cadre porté par un fil de torsion⁽¹⁾ muni d'un long index ou d'un miroir.

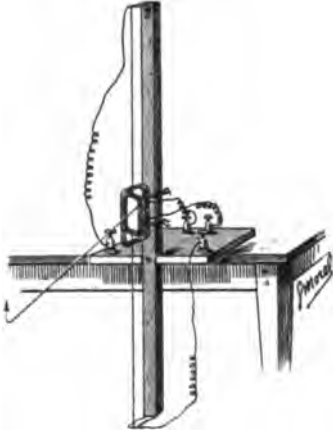
Comme le cadre mobile ne doit plus entrer dans le champ d'un aimant, on peut lui donner des dimensions plus grandes ($12^{\text{cm}} \times 5^{\text{cm}}$). Il sera, par exemple, formé d'une quarantaine de tours de fil ($d = 0^{\text{cm}},05$).

Le champ est créé par un cadre rectangulaire ($16^{\text{cm}} \times 7^{\text{cm}}$)

⁽¹⁾ La sensibilité de l'appareil varie en raison inverse de la quatrième puissance du diamètre du fil de suspension.

formé aussi de 40 tours du même fil qu'on lie solidement contre le support du cadre mobile. On le déforme un peu pour lui permettre de contourner le fil de torsion.

L'appareil est monté comme l'indique la figure; il se place facilement sur le bord d'une table ou sur un support horizontal quelconque.



Expériences. — Placer un rhéostat (1) et un ampèremètre de 0 à 5 ampères dans le circuit de chacun des deux cadres.

Ces ampèremètres pourront être des boussoles des tangentes (VII, 131) ou des galvanomètres à cadre mobile à gros fil (VII, 161).

Envoyer dans le cadre mobile un courant de 5 ampères et constater que le champ terrestre ne produit qu'une action insignifiante. Si l'on jugeait nécessaire d'atténuer encore cette action, il suffirait de placer le cadre mobile perpendiculairement au méridien.

S'assurer encore, par retournement de ces appareils, que les ampèremètres et les rhéostats sont sans action sur le cadre mobile quand les courants passent.

Envoyer alors dans l'un des cadres, le cadre fixe par exemple, un courant invariable (3 ampères) et faire croître de 0 à 5 ampères le courant qui passe dans l'autre circuit.

Les déviations mesurées doivent être sensiblement proportionnelles aux intensités de courant correspondantes et changer de sens sans changer de grandeur quand on change le sens du courant. On s'approche davantage de la proportionnalité en partant d'une

(1) On peut se dispenser d'employer des rhéostats et graduer les courants en mettant successivement dans chaque circuit un élément de pile, puis deux, puis trois, etc. Comme la résistance des cadres est de l'ordre de grandeur de l'ohm, on n'a pas à craindre de court-circuit. Mais, avec ce procédé, les courants ne pourront pas être maintenus bien constants, leur intensité diminue progressivement, non seulement par suite de la polarisation des piles, mais aussi par suite de l'augmentation de résistance des fils qui est la conséquence de leur échauffement par le courant.

position dissymétrique, de façon que le passage du courant ramène d'abord le cadre dans le plan de symétrie pour le faire dévier ensuite de l'autre côté.

La proportionnalité est d'autant plus approchée que les déviations sont plus petites. On obtiendra donc une meilleure vérification si l'on emploie des courants plus faibles et si l'on fait les observations par un procédé de réflexion. Mais il faut alors garantir l'appareil contre les courants d'air.

— Envoyer ensuite le même courant invariable de 3 ampères dans le cadre mobile et faire croître de 0 à 5 ampères le courant qui passe dans le cadre fixe. Les déviations devront encore être sensiblement proportionnelles aux intensités.

— Contrôler encore ces mesures en envoyant le même courant dans les deux cadres. Les déviations sont maintenant sensiblement proportionnelles aux carrés des intensités et ne changent plus de sens quand on change le sens du courant commun. L'instrument peut donc servir pour la mesure des courants alternatifs.

En comparant les trois séries de mesures, on constatera qu'elles sont *exactement* représentées par une même courbe quand on prend pour coordonnées d'une part la déviation et d'autre part le produit des intensités des courants qui parcourent les deux cadres.

163. Wattmètre. — *Montage.* — L'appareil est un électrodynamomètre (VII, 162). Le cadre fixe est traversé par le courant principal, tandis que le cadre mobile est parcouru par un courant pris en dérivation aux bornes de l'appareil d'utilisation et qui traverse en outre une résistance non inductive.

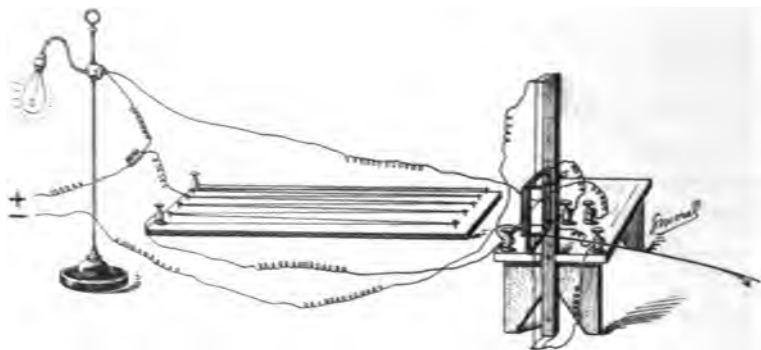
Le cadre mobile est à fil fin (40 tours; $d = 0^{\text{cm}}, 05$). Le cadre fixe est à gros fil (20 tours; $d = 0^{\text{cm}}, 2$). La résistance non inductive est formée par du fil de manganine ($l = 20$ mètres, $d = 0^{\text{cm}}, 02$) cloué en zigzags sur une planche (100^{cm} ; 22^{cm} ; $1^{\text{cm}}, 5$) et dont on utilise la longueur nécessaire (*fig.* p. 350).

— En établissant les connexions comme nous l'avons indiqué, le courant que l'on envoie dans le cadre fixe n'est pas seulement le courant qui traverse l'appareil d'utilisation, il comprend encore l'intensité du courant dérivé; et il peut en résulter une erreur sensible.

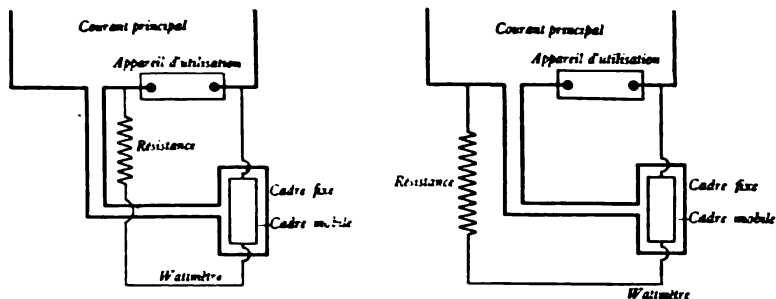
On aura, le plus souvent, une erreur beaucoup plus faible en prenant la dérivation à la fois sur l'appareil étudié et sur le gros fil

du wattmètre, puisque la résistance du gros fil n'est que d'une petite fraction d'ohm. Nous donnons ci-dessous les diagrammes des deux dispositions.

Avec ce dernier montage, on peut augmenter beaucoup l'inten-



sité du courant dérivé dans le cadre mobile et l'on étend ainsi dans de grandes proportions le champ des mesures auxquelles se prête l'appareil. C'est ainsi qu'un appareil construit suivant les données numériques que nous avons indiquées peut mesurer des



puissances de quelques watts et des puissances de plus d'un kilowatt.

Expériences. — Étalonner le wattmètre en courants continus. On mesurera pour cela avec cet appareil la puissance dépensée sur un fil de manganèse ($l = 200^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{mm}}, 05$) parcouru par un courant de plusieurs ampères dont on déterminera en même temps l'intensité et la force électromotrice avec des instruments étalonnés.

— Mesurer avec le wattmètre l'énergie dépensée dans un fil fin plongé dans l'eau d'un calorimètre et déterminer en même temps la quantité de chaleur dégagée.

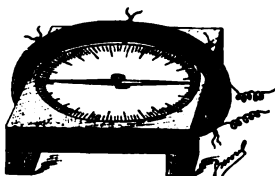
Faire varier l'intensité du courant et vérifier que les deux nombres obtenus restent exactement proportionnels. Répéter encore ces mesures avec des courants alternatifs et vérifier que la concordance subsiste.

— Mesurer avec le wattmètre l'énergie dépensée dans une lampe à incandescence ou dans un rhéostat, dans une lampe à arc, dans un moteur — et dans un électro-aimant (**VII, 143**).

Répéter cette dernière mesure avec des courants alternatifs et vérifier que l'énergie est alors mesurée par un nombre beaucoup plus faible que le produit du nombre de volts par le nombre d'ampères.

LOIS DE L'INDUCTION.

164. Galvanomètre. — On construit un *galvanomètre* qui peut servir comme *balistique* (**VII, 62**) en enroulant environ 150 tours de fil ($d = 0^{\text{cm}}, 07$) autour du cadre d'une boussole ($D = 7^{\text{cm}}$). L'appareil est sensible au $\frac{1}{100000}$ d'ampère en courant permanent. Comme balistique, il peut déceler le passage de quelques cent millièmes de coulomb.



On peut augmenter cette sensibilité en réduisant le champ terrestre au moyen d'un aimant auxiliaire



(aiguille à tricoter) placé au nord de la boussole. On ne doit

cependant pas aller très loin dans cette voie, car il faut que la force directrice soit suffisante pour ramener l'aiguille aimantée dans sa position d'équilibre malgré le frottement du pivot.

— On obtiendrait facilement, au contraire, une sensibilité 100 fois plus grande en faisant agir les 150 tours de fil sur l'aimant d'un magnétomètre à miroir (VII, 124) (*fig.* p. 351).

165. Induction par le champ terrestre. Mesure de l'inclinaison. — Prendre comme circuit induit un enroulement comportant une cinquantaine de tours de fil ($d = 0^{\text{cm}}, 15$) attachés sur un grand cerceau de bois ($D = 100^{\text{cm}}$).

Relier ce cadre mobile au galvanomètre (VII, 164) par des fils souples un peu longs et constater d'abord que le galvanomètre ne dévie pas quand on déplace le cerceau dans son propre plan.

Placer ensuite le cerceau verticalement dans un azimut quelconque et le retourner brusquement face pour face. Faire varier l'azimut dans lequel on fait l'expérience et étudier les différentes valeurs de l'impulsion du galvanomètre (1) pour les différentes positions initiales du cerceau. L'impulsion est proportionnelle au *sinus* de l'angle que fait la position initiale du cerceau avec le méridien magnétique.

Mesurer aussi l'impulsion obtenue quand on retourne le cerceau placé horizontalement.

D'après toutes ces mesures, quelle est la valeur de l'*inclinaison* du champ magnétique terrestre (64, 157)?

— Le sens des déviations obtenues est-il celui que faisait prévoir la loi de l'opposition du flux induit et du flux inducteur?

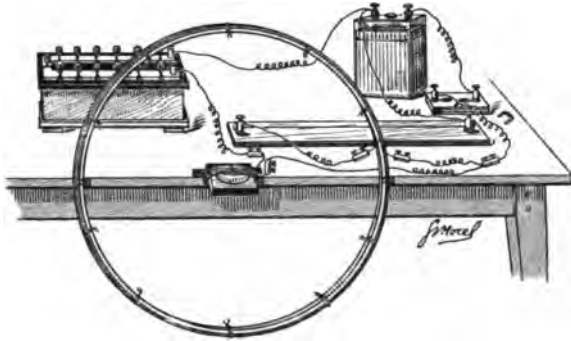
166. Mesure absolue. Détermination de l'ohm. — Fixer un galvanomètre boussole (VII, 164) sur le bord d'une table orientée dans la direction nord-sud et le relier au cadre mobile de l'expérience précédente.

Placer le cadre mobile verticalement dans l'azimut est-ouest, le retourner brusquement face pour face, et lire l'impulsion α de l'aiguille aimantée. Si l'amortissement du galvanomètre est faible, la valeur de cette impulsion est reliée à la *valeur absolue* R de la résistance totale du circuit par la formule

$$R = 4\pi \frac{GS}{T\alpha}$$

(1) C'est, en réalité, le *sinus de la demi-déviatiou* que l'on devrait déterminer.

où G représente la *constante* du galvanomètre, T la période des oscillations de l'aiguille aimantée et S la surface totale du cadre



mobile. Ces deux dernières quantités sont faciles à déterminer; une nouvelle mesure fera connaître la constante du galvanomètre.

Constante du galvanomètre. — On la détermine par comparaison avec une boussole des tangentes dont la *constante* est connue en valeur absolue ⁽¹⁾. On peut constituer cette boussole des tangentes avec le cadre circulaire qui vient de servir dans les expériences d'induction et que l'on fixe contre le bord de la table, concentriquement au galvanomètre.

Mettre le circuit du galvanomètre en communication avec un élément de pile par l'intermédiaire d'une boîte de résistance et d'un interrupteur. Mettre aussi le circuit du grand cadre circulaire en dérivation sur la même force électromotrice par l'intermédiaire d'une résistance de quelques ohms faite d'un fil de manganinc.

Régler la résistance qui se trouve dans le premier circuit à une valeur telle que l'aiguille aimantée ne dévie pas quand on envoie le courant en même temps dans les deux circuits. Le rapport des *constantes* des deux galvanomètres, que l'on cherchait à déterminer, est alors égal au rapport des résistances de leurs circuits respectifs et ce rapport se détermine avec un pont de Wheatstone (VII, 70).

167. Induction par un aimant ⁽²⁾. — *Induction dans un disque mobile.* — Découper un disque de zinc ($d = 20\text{cm}$; $e = 0\text{cm}, 1$) et souder en son centre une aiguille à tricoter. Chauff-

⁽¹⁾ Pour n spires de rayon r , la *constante* est $2\pi \frac{n}{r}$.

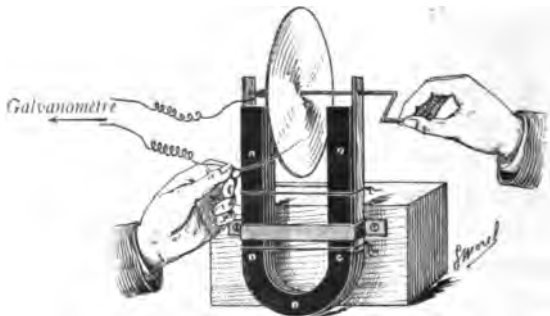
⁽²⁾ Voir aussi les expériences décrites à propos de la mesure des champs magnétiques par les phénomènes d'induction (VII, 142).

fer une extrémité de cette aiguille au rouge et la courber en forme de manivelle.

Monter l'axe du disque entre deux planchettes (20cm ; 3cm ; 1cm) et attacher enfin ces planchettes de part et d'autre des deux branches d'un fort aimant en fer à cheval, fixé lui-même contre un support quelconque (caisse en bois, $h = 20\text{cm}$).

Relier l'axe du disque à l'une des bornes d'un galvanomètre à faible résistance et tenir à la main un fil de cuivre aboutissant à l'autre borne.

Si l'on fait alors tourner le disque et si l'on touche un point de



sa surface avec le bout libre du fil de cuivre, on constate qu'il passe un courant dans le galvanomètre.

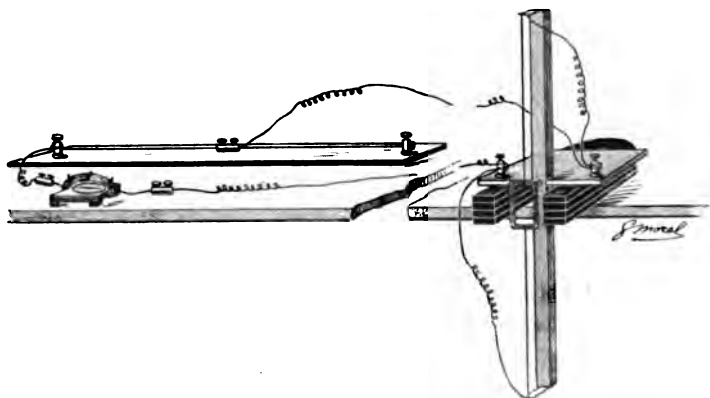
La déviation du galvanomètre change de sens avec le sens du mouvement, elle est proportionnelle à la vitesse et en raison inverse de la résistance du circuit. Elle est en outre d'autant plus grande que le point de contact avec le disque est plus éloigné de l'axe et que ce point de contact est placé dans une région où le champ est plus fort (118).

Induction dans un cadre mobile. — Mettre dans un même circuit notre galvanomètre balistique (VII, 164) et un galvanomètre à cadre mobile (VII, 161). Tourner brusquement le cadre mobile dans le champ de l'aimant et mesurer l'impulsion du balistique.

Recommencer la mesure en produisant le mouvement du cadre en deux temps et vérifier que la somme des impulsions obtenues est égale à l'impulsion que donne le déplacement total.

— Déplacer plusieurs fois le cadre mobile *d'un petit angle*, en partant, à chaque fois, d'une autre position initiale.

Les impulsions se produisent maintenant dans un sens ou dans l'autre, selon que le déplacement du cadre a pour effet d'augmenter ou de diminuer le flux qui le traverse. L'impulsion s'annule quand



le cadre est perpendiculaire au champ, c'est-à-dire quand le flux correspondant est maximum.

Opposition du flux induit et du flux inducteur. — Envoyer un courant dans le circuit des deux galvanomètres et reconnaître que les courants induits s'étaient bien produits dans un sens tel qu'ils tendaient à s'opposer au mouvement du cadre mobile.

— Fermer le circuit du galvanomètre sur une boîte de résistances et faire osciller le cadre mobile. Étudier la manière dont varie l'amortissement des oscillations quand on diminue progressivement la résistance du circuit. Pour une certaine valeur de cette résistance, le galvanomètre devient *apériodique*; il retourne lentement vers sa position d'équilibre sans osciller (¹).

— Pour des expériences de cours, les dispositifs représentés par la figure de la page 356 permettent de montrer l'amortissement que les courants induits produisent sur un système oscillant. On vérifiera que l'amortissement ne se produit que si le mouvement

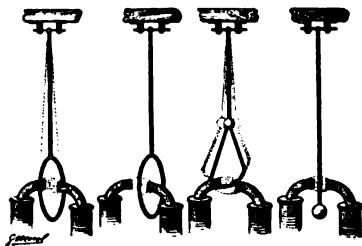
(¹) Avec un cadre formé de N tours de fil de surface S , ayant un moment d'inertie M , se déplaçant dans un champ H , et soutenu par un fil dont le couple de torsion est C , la valeur de la résistance critique d'apériodicité est donnée par la formule

$$R = \frac{N^2 S^2 H^2}{2 \sqrt{M C}}.$$

L'*apériodicité* n'est donc possible que si la résistance propre du galvanomètre est inférieure à cette valeur critique.

du circuit mobile a pour effet de faire varier le flux qui le traverse (167).

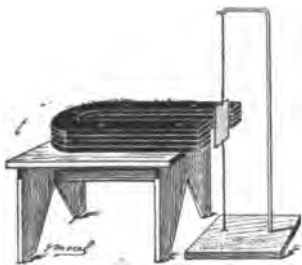
— Ce sont des effets du même genre que l'on réalise sur une



plus grande échelle quand on met d'abord une machine dynamo en mouvement en circuit ouvert et qu'on l'arrête presque instantanément en fermant le circuit (41, 126).

On peut dire que c'est encore en conformité avec la règle d'opposition du flux induit et du flux inducteur que l'on est obligé d'exercer des efforts moteurs plus grands pour faire tourner une machine dynamo lorsque le circuit est fermé que lorsque le circuit est ouvert.

Courants induits dans les masses métalliques. — Suspendre verticalement une plaque de cuivre rouge (8^{cm}; 4^{cm}; 0^{cm}, 3) entre deux fils à coudre un peu gros ou entre deux bandes de caoutchouc.



Tordre les fils de suspension, puis les laisser se détordre. La plaque de cuivre tourne d'un mouvement rapide.

Approcher alors un fort aimant ou un électro-aimant horizontal. Le mouvement de la plaque de cuivre se ralentit beaucoup en se continuant par saccades. L'effet produit est le même que si un frottement se produisait quand la plaque est parallèle aux lignes de force, pour disparaître au moment où cette plaque est traversée par le flux magnétique maximum.

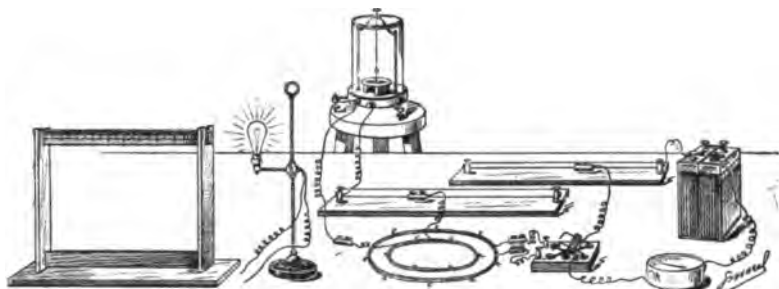
Le mouvement arrive même à s'arrêter complètement parce que le cuivre contient généralement du fer provenant des limes et des scies. Si l'on opère avec un *cylindre* de cuivre rouge fondu, le mouvement se ralentit mais ne s'arrête pas (46, 103).

168. Induction mutuelle de deux circuits. — On se sert de deux bobines de dimensions voisines ($D = 15^{\text{cm}}$ et $D = 20^{\text{cm}}$) qui sont, par exemple, formées toutes les deux d'une centaine de tours de fil ($d = 0^{\text{mm}}, 1$), et dont les résistances sont, par conséquent, voisines de 1 ohm (1).

Le galvanomètre-boussole, relativement peu sensible, que nous avons indiqué (**VII, 164**), suffit pour ces expériences si l'on peut disposer de plusieurs ampères pour le courant inducteur. Si l'on n'a que des courants plus faibles, on peut augmenter les déviations obtenues en renouvelant le phénomène d'induction plusieurs fois de suite, aux moments précis où l'aiguille aimantée passe et repasse par sa position d'équilibre.

On vérifiera expérimentalement les propositions suivantes :

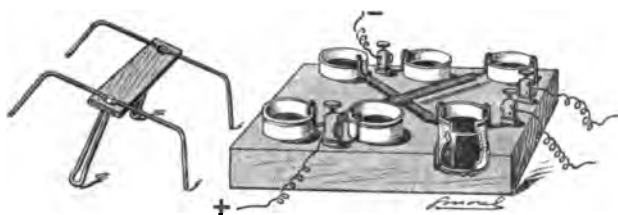
1° Les impulsions produites à l'établissement et à la rupture du



courant sont égales et de sens contraires. Ces impulsions changent de sens quand on change le sens du courant, et l'on obtient une impulsion double en inversant brusquement le courant inducteur (2).

(1) On peut se servir des deux circuits d'un électrodynamomètre (**VII, 162**).

(2) La figure ci-dessous représente un inverseur à action rapide. Il est con-



stitué par 6 pots en faïence ($V = 8^{\text{cm}^3}$) contenant du mercure et collés dans des trous percés au vilebrequin dans une planchette ($15^{\text{mm}}; 7^{\text{mm}}; 2^{\text{mm}}, 5$). Des communications permanentes sont établies en diagonale par des fils de cuivre isolés. La commutation se fait au moyen d'un basculeur formé de deux fils de cuivre

2° On obtient les mêmes impulsions en éloignant brusquement le circuit induit ou le circuit inducteur au lieu de supprimer le courant. On obtient une impulsion double en retournant ces circuits. — Mais on n'obtient aucune impulsion en déplaçant tout d'une pièce l'ensemble du circuit inducteur et du circuit induit.

3° L'impulsion de l'aiguille aimantée est proportionnelle au courant qui la produit. Si le courant inducteur est établi en deux temps, la somme des deux impulsions successives est égale à l'impulsion que l'on obtient par l'établissement du courant total.

4° Les impulsions produites par un même courant inducteur varient en raison inverse de la résistance du circuit induit.

Dans toutes les expériences où l'on déplace le circuit induit, on devrait mesurer d'abord l'action produite par le champ terrestre et la retrancher de l'action totale observée; on verra expérimentalement s'il est nécessaire de faire cette correction (103; 175).

— Voici une expérience de cours montrant qualitativement l'existence des courants induits. On prend le circuit primaire d'une forte bobine d'induction, et on l'alimente par un courant traversant un interrupteur à interruptions rapides. On approche de cet inducteur un circuit induit formé par une couronne de fil de cuivre isolé dont les extrémités sont reliées à une lampe à incandescence à bas voltage. La lampe s'allume sous l'action des courants induits (25).

169. Comparaison de deux coefficients d'induction mutuelle. — L'impulsion que donne au galvanomètre l'établissement du courant I est proportionnelle au quotient $\frac{MI}{R}$, où M est le coefficient d'induction des deux circuits et R la résistance du circuit induit. La mesure des impulsions et des résistances permet donc de comparer les coefficients d'induction mutuelle.

On vérifiera que le coefficient d'induction mutuelle de deux circuits de forme invariable est proportionnel au produit de leurs nombres de tours.

En permutant les enroulements inducteur et induit, on vérifiera aussi que le coefficient d'induction du premier circuit sur le second est égal au coefficient d'induction du second sur le premier.

recourbés ($d = 0^{\text{cm}}, 2$), portés par une même plaque de bois dur ($7^{\text{cm}}, 4^{\text{cm}}, 1^{\text{cm}}$): ces fils de cuivre passent dans des trous percés dans la plaque de bois, et ils y sont fixés au moyen de deux chevilles de bois tendre qu'on entre d'un coup de marteau.

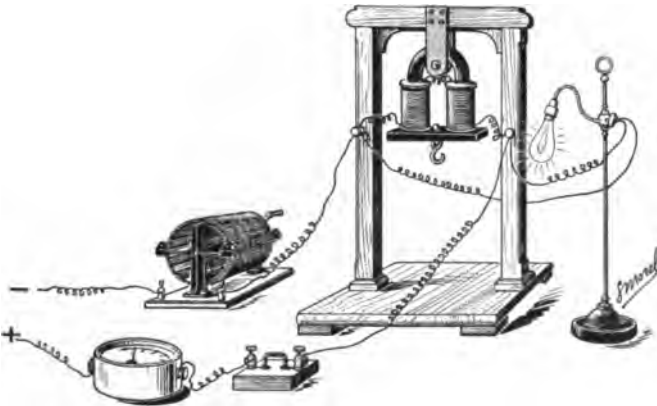
170. Valeurs absolues. Détermination de l'ohm. — Pour avoir la valeur absolue d'un coefficient d'induction, on le compare au coefficient d'induction mutuelle d'un solénoïde et d'une bobine enroulée autour du milieu de ce solénoïde (**VII, 142**). Ce dernier coefficient d'induction est connu en valeur absolue.

Ces mesures absolues peuvent fournir une détermination de l'ohm.

Envoyons, en effet, dans le galvanomètre balistique, une dérivation du courant inducteur, et supposons que la $p^{\text{ième}}$ partie de ce courant produise une déviation égale à l'impulsion de tout à l'heure. Si l'amortissement du galvanomètre est faible on aura la valeur absolue de la résistance du circuit induit par la formule $R = p \frac{2\pi}{T} M$, où T est la période des oscillations de l'aiguille aimantée et M le coefficient d'induction mutuelle des deux circuits.

SELF-INDUCTION.

171. Expériences qualitatives. — Prendre un fort électro-aimant (**VII, 143**) et fermer son *circuit magnétique* avec l'ar-



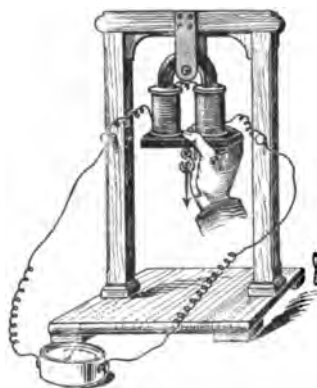
mature de fer. Mettre un ampèremètre dans le circuit et envoyer dans l'appareil le courant d'une batterie de piles ou d'accumulateurs de résistance intérieure très faible.

Le courant s'établit progressivement et peut mettre plusieurs secondes à atteindre sa valeur maxima. — Ce temps est d'autant

plus grand que l'électro-aimant est plus gros et que la résistance du circuit est plus faible. — Si l'on répète l'expérience avec l'électro-aimant sans armature, l'établissement du courant est beaucoup plus rapide.

Une fois le courant établi, approcher l'armature ou l'éloigner des pôles de l'électro-aimant. L'ampèremètre montre que ces mouvements produisent des courants induits qui se superposent au courant initial. Leur sens est tel qu'ils tendent à s'opposer à la variation du flux.

C'est un phénomène analogue qui produit les courants électriques dans les téléphones magnétiques sans microphones.



— L'électro-aimant muni de son armature ayant été aimanté par le passage du courant, si l'on supprime ce courant, le fer reste aimanté (VII, 137) et le circuit reste traversé par un flux considérable.

Fermer alors le circuit de l'électro-aimant sur l'ampèremètre, et arracher l'armature. Le fer se désaimante, le flux disparaît et l'ampèremètre indique un courant induit.

— Mettre *en dérivation* sur les bornes de l'électro-aimant une lampe à incandescence ayant une tension normale égale à celle de la batterie dont on dispose et que l'on a choisie d'une puissance assez faible pour que sa résistance soit comparable à celle de l'électro-aimant. Mettre ensuite *en tension* avec l'ensemble de ces deux appareils un rhéostat ayant une résistance à peu près égale à celle du reste du circuit.

Lorsque le courant permanent est établi, la lampe est parcourue par un courant qui est insuffisant pour l'illuminer.

Par suite des effets d'induction, le courant de la lampe devient plus fort au moment où l'on établit et au moment où l'on supprime la force électromotrice qui alimente le circuit bifurqué. Si donc on produit des interruptions un peu fréquentes du courant, — ou bien si l'on envoie un courant alternatif dans l'appareil — on voit la lampe briller d'un vif éclat.

Si l'électro-aimant est très gros, et si le filament de la lampe

est très fin, le temps que le courant met à s'établir dans l'électro-aimant peut être notablement plus grand que le temps que la lampe met à s'allumer. S'il en est ainsi, il n'est pas nécessaire de produire des interruptions fréquentes du courant : on voit la lampe s'allumer un instant à chaque établissement du courant (66, 75, 100, 126).

172. Expériences avec le pont de Wheatstone. —

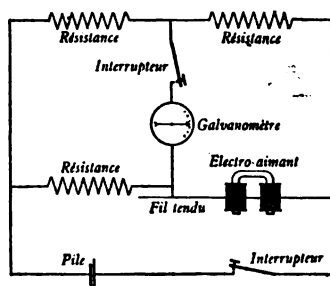
Montage. — Prendre un assez gros enroulement de fils de cuivre, comme sont les bobines d'un électro-aimant (VII, 143). Se procurer un rhéostat ayant à peu près la même résistance, et prendre encore deux autres rhéostats ayant des résistances notablement plus grandes et à peu près égales entre elles.

Avec ces quatre résistances et un *fil de manganine* assez gros pour supporter un courant de quelques ampères ($l = 100\text{ cm}$; $d = 0\text{ cm}, 1$), constituer un pont de Wheatstone à contact glissant disposé pour la comparaison des résistances très voisines, comme nous l'avons indiqué précédemment (VII, 72).

Le courant est fourni par une batterie d'une force électromotrice de quelques volts et l'on prend comme instrument d'observation un galvanomètre *balistique* (VII, 164), que l'on doit placer assez loin de l'électro-aimant pour qu'il ne soit pas influencé par le champ qui se produit quand le courant passe.

On met, enfin, des interrupteurs dans le circuit de la pile et dans celui du galvanomètre.

Ces interrupteurs peuvent être montés sur une même plan-



chette. Ils sont formés chacun d'une lame flexible en laiton battu (7 cm ; 1 cm ; $0\text{ cm}, 05$), sur la face supérieure de laquelle on coule un peu de cire à cacheter pour qu'il ne puisse pas s'établir de dérivation à travers la main pendant la manœuvre des interrupteurs.

Expériences. — Faire passer le courant et établir l'équilibre du pont en réglant les résistances.

Ceci fait, laissant le circuit du galvanomètre fermé en permanence, établir ou rompre le circuit de la pile et mesurer l'*impulsion* du galvanomètre. Cette impulsion est due à la self-induction des bobines employées. Elle est proportionnelle au flux qui traversait ces bobines.

On vérifiera en effet qu'on augmente les impulsions en prenant successivement comme source d'électricité une pile formée de 1, puis de 2 ou de 3 éléments en tension. On voit aussi cette impulsion augmenter si l'on munit les bobines d'un noyau de fer. Elle augmente encore si l'on ferme le circuit magnétique en munissant l'électro-aimant de son armature.

— Dans ce dernier cas, le flux n'augmente plus proportionnellement au courant (**VII, 144**), et il en est de même de l'impulsion du galvanomètre. De plus, la durée d'établissement du courant peut être devenue considérable, et le galvanomètre cesse alors de fonctionner comme balistique.

Durée d'établissement du courant. — Fermer d'abord le circuit de la pile en laissant ouvert le circuit du galvanomètre. Fermer le circuit du galvanomètre un court instant après. On obtient encore une impulsion; le régime permanent n'était donc pas encore atteint au moment où l'on a fermé le circuit du galvanomètre.

Avec un électro-aimant modérément gros (**VII, 143**) employé en circuit magnétique fermé, l'établissement du courant demande un temps de l'ordre de la seconde.

Continuation d'un courant par self-induction. — L'expérience inverse est plus frappante. Le circuit du galvanomètre étant préalablement ouvert, on rompt la communication avec la pile; puis, un instant après, on ferme le circuit du galvanomètre. On obtient encore une déviation. La désaimantation progressive de l'électro-aimant crée donc une force électromotrice. Le sens de cette force électromotrice est tel que le courant produit tend à s'opposer à la désaimantation.

Avec un électro-aimant un peu gros, cette période de désaimantation et le courant qui en résulte durent un temps de l'ordre de la seconde, comme la période d'établissement du courant.

173. Emploi des courants alternatifs. — Monter un pont de Wheatstone en plaçant dans deux branches opposées les deux bobines d'un fort électro-aimant muni de son armature. Prendre

pour les deux autres branches des résistances non inductives d'une valeur voisine de celle des bobines de l'électro-aimant.

Alimenter le pont avec une pile quelconque et régler les résistances pour établir l'équilibre en courant permanent.

Remplacer alors le galvanomètre qui servait d'instrument de zéro par une lampe à incandescence et alimenter le pont par un circuit à courants alternatifs dont la force électromotrice corresponde à la tension normale de la lampe. On constatera que l'équilibre est rompu et que la lampe s'illumine.

Le courant alternatif peut être remplacé par un courant continu dans lequel on produit des interruptions très fréquentes (VII, 175).

Pour l'observation individuelle, on peut se servir d'un simple électro-aimant de sonnerie et prendre un téléphone comme instrument de zéro (VII, 77).

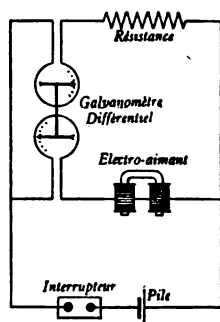
174. Emploi d'un galvanomètre différentiel. — Mettre une résistance inductive dans l'un des circuits et mettre une résistance sans self-induction dans l'autre circuit. Monter ces deux circuits en dérivation, les alimenter avec une même pile et établir l'équilibre en régime permanent par le réglage des résistances.

Au moment où l'on établit le courant, le galvanomètre différentiel dévie, comme si la résistance du circuit inductif était augmentée pendant l'établissement du courant.

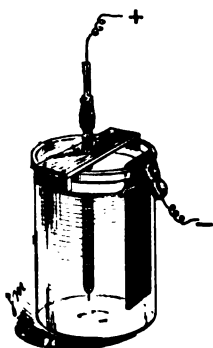
175. Interrupteur électrolytique. — Souder un fil de platine ($l = 3\text{cm}$; $d = 0^{\text{cm}},05$) au bout d'un tube de verre ($l = 25\text{cm}$; diam. ext. = $0^{\text{cm}},5$). Mettre quelques gouttes de mercure dans ce tube et y faire pénétrer un fil de cuivre.

Prendre un autre tube de verre ($l = 15\text{cm}$) dans lequel le premier passe sans frottement. Mettre une extrémité de ce tube dans la flamme du chalumeau pour fondre et rassembler les bords de l'ouverture jusqu'à ce que cette ouverture n'ait plus qu'un très petit diamètre ($d = 0^{\text{cm}},1$).

Enfiler alors les deux tubes l'un dans l'autre en faisant passer le fil de platine à travers la petite ouverture, et relier ces deux tubes de verre par un bout de tube de caoutchouc (feuille anglaise) qui



forme entre eux un joint étanche, mais qui permet le glissement des deux parties de l'appareil l'une dans l'autre.



Préparer d'autre part un vase ($V = 1^l$) contenant de l'eau acidulée sulfurique à 10 pour 100 et mettre dans ce vase une lame de plomb (15^{cm} ; 5^{cm} ; 0^{cm} , 1).

Soutenir l'électrode de platine au centre de ce vase cylindrique, en la faisant passer, par exemple, dans un bouchon fixé dans une planchette reposant sur les bords du vase.

Relier l'électrode de platine au pôle positif et l'électrode de plomb au pôle négatif, en intercalant dans le circuit un enroulement possédant une self-induction un peu forte, tel qu'un électro-aimant ou bien le circuit primaire d'une bobine d'induction.

Lorsqu'on ferme le circuit, on voit l'électrode de platine rougir et s'entourer d'une gaine gazeuse illuminée par des effluves. On obtient alors non pas un courant continu, mais un courant interrompu dont les ruptures sont brusques et complètes, et d'autant plus fréquentes que la longueur utilisée du fil de platine est plus courte.

La fréquence des interruptions est en outre d'autant plus élevée que la valeur de la self-induction du circuit est plus faible. Avec les petites bobines d'induction, on peut avoir plusieurs milliers d'interruptions par seconde. La bobine, même dépourvue de condensateur, fonctionne alors mieux qu'avec les meilleurs interrupteurs mécaniques et donne des effets d'une grande puissance.

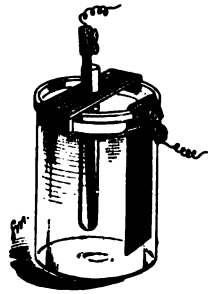
On doit cependant être attentif à ne pas faire fonctionner longtemps une bobine d'induction avec un interrupteur électrolytique si la bobine n'a pas été spécialement construite en vue de ce fonctionnement intensif. La grande fréquence des interruptions produit en effet un échauffement excessif *du fer* et par conséquent *du circuit primaire*, qui compromet l'isolement.

Tension primaire. — Les interrupteurs électrolytiques fonctionnent *presque* aussi bien avec des courants alternatifs qu'avec des courants continus. Ils demandent une tension comprise entre 40 et 100 volts. On peut cependant opérer à plus basse tension (12 volts) en se servant d'eau acidulée chauffée vers 60° .

176. Interrupteurs électrolytiques sans platine. — On

peut remplacer le fil de platine par un fil de cuivre ($D = 0^{\text{cm}}, 1$) que l'on prend comme pôle *négalif*. L'appareil fonctionne moins bien qu'avec le platine.

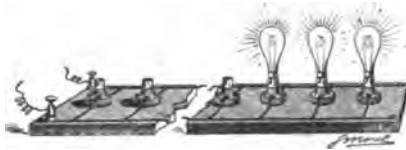
— On fait un interrupteur électrolytique très bon mais un peu fragile, avec un tube à essais en verre mince dans la paroi duquel on a percé un trou d'un diamètre d'environ $0^{\text{cm}}, 05$. On met ce tube à essais dans un vase contenant de l'eau acidulée et l'on y fait passer le courant au moyen de deux électrodes de plomb placées l'une dans le tube et l'autre à l'extérieur.



— *Application des interrupteurs électrolytiques à l'étude des courants alternatifs.* Le courant fourni par un interrupteur électrolytique peut être considéré comme étant la superposition d'un courant continu et d'un courant alternatif dissymétrique. On peut s'en servir à la place d'un courant alternatif dans un assez grand nombre d'expériences; on a même l'avantage de pouvoir disposer à volonté de la fréquence.

MACHINE DYNAMO GÉNÉRATRICE.

177. Rhéostats. — On emploie souvent comme rhéostats de consommation des groupes de lampes à incandescence montées en dérivation. On fixe tous les supports sur une même planche,

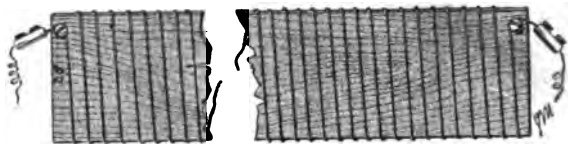


et la *conductance* du rhéostat est proportionnelle au nombre des lampes allumées.

— On construit des rhéostats très économiques avec du fil de fer ($d = 0^{\text{cm}}, 1$) que l'on enroule, en éléments séparés, sur des planches de sapin ($100^{\text{cm}}, 10^{\text{cm}}, 1^{\text{cm}}$). Le fil est fortement tendu au moment de l'enroulement et les spires écartées d'environ $0^{\text{cm}}, 7$.

Le fil de fer supporte facilement 5 ou 6 ampères. La résistance des éléments de 1^{m} de long est d'une vingtaine d'ohms, ces élé-

ments peuvent donc être placés sur des circuits à 110 volts. On

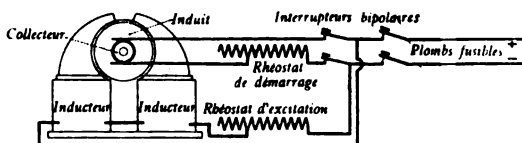


emploie en dérivation autant de ces éléments qu'il en faut pour absorber la totalité du courant (1).

178. Moteur. — Nous supposons que l'on dispose, pour entraîner la machine, d'un moteur dont on puisse faire varier la vitesse à volonté.

Le plus commode est de se servir d'une seconde dynamo qu'on fait fonctionner comme *moteur shunt*. Le moteur et la génératrice sont fixés sur un même bâti et l'entraînement se fait par courroie.

Les connexions du *moteur* sont disposées suivant les indications du diagramme ci-dessous. On met en route en fermant d'abord le



circuit des inducteurs, puis celui de l'armature. Ces deux circuits sont alimentés par la source d'électricité que nous supposons à potentiel constant, et ils contiennent deux rhéostats indépendants.

On opère généralement avec une excitation constante correspondant au régime normal de la machine. Le réglage de la vitesse se fait par la manœuvre du *rhéostat de démarrage* qui se trouve dans le circuit de l'armature.

On vérifiera le sens des connexions avant la mise en marche pour éviter que la machine ne tourne à l'envers (144 bis, 172 bis).

179. Caractéristique à circuit ouvert. — Monter la machine génératrice avec une excitation indépendante en mettant un rhéostat et un ampèremètre dans le circuit d'excitation et en alimentant directement ce circuit avec la source d'électricité à

(1) On constitue une résistance de l'ordre du megohm avec un trait de crayon sur de l'ébonite, ou bien avec un trait fait avec une tige d'aluminium sur une plaque de verre très propre (39, 175).

potentiel constant. Disposer, en outre, un voltmètre pour prendre la différence de potentiel entre les balais.

La machine devra marcher constamment à sa vitesse normale



que l'on contrôlera avec un *compteur de tours* en déterminant le nombre de tours que fait la machine pendant une minute (1).

Expériences. — Mesurer la force électromotrice aux balais de la machine pour des valeurs croissantes de l'excitation en vérifiant à chaque fois la constance de la vitesse. Si cette vitesse n'est pas exactement celle que l'on s'est imposée, il est aisé de faire une correction pour tenir compte de cette différence, car nous allons voir que la force électromotrice est presque exactement proportionnelle à la vitesse.

(1) La vitesse de rotation d'une machine de petites dimensions peut être maintenue constante au millième près. On fixe sur l'axe un disque blanc portant une



série de couronnes concentriques formées de secteurs alternativement blancs et noirs dont le nombre varie d'une unité d'une couronne à la suivante. On observe ce *disque stroboscopique* à travers deux fentes étroites ($1^{\text{cm}},5$; $0^{\text{cm}},1$) pratiquées

Résumer ces mesures en construisant la courbe représentant les variations de la force électromotrice de la machine en fonction de l'intensité du courant magnétisant.

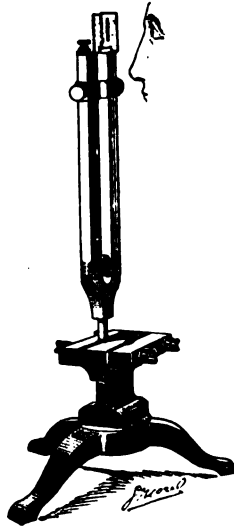


C'est la *caractéristique à circuit ouvert* ou *courbe d'aimantation* de la machine.

Influence de la vitesse. — Reprendre les expériences précédentes en laissant l'excitation constante et en faisant varier la vitesse.

Construire la courbe représentant les variations de la force élec-

dans des lames d'aluminium ($e = 0^{\text{mm}},05$) qu'on fixe sur les branches d'un diapa-



on. Si les deux mouvements périodiques sont synchrones ou si les périodes sont dans un rapport simple, l'une des couronnes semble immobile.

Si le synchronisme est presque atteint, cette couronne semble tourner en avant ou en arrière selon le sens de l'écart. En appuyant plus ou moins sur l'axe avec un frein fait d'une ficelle qu'on tient à la main, on arrive facilement à maintenir cette couronne immobile, c'est-à-dire à maintenir le synchronisme. La vitesse moyenne est alors connue avec la précision même avec laquelle on a pu déterminer la période des vibrations du diapason.

tromotrice en fonction de la vitesse. Cette courbe est presque rigoureusement rectiligne (172 bis).

180. Caractéristique en charge avec excitation constante. — C'est la courbe des différences de potentiel aux balais en fonction de l'intensité du courant débité par la machine quand on laisse constants le courant d'excitation et la vitesse.

Placer un rhéostat et un ampèremètre dans le circuit de l'*induit* et mettre la machine en marche. Amener la vitesse à la valeur convenue en agissant sur les rhéostats du moteur qui entraîne la machine et s'assurer que l'excitation est bien restée constante.

Mesurer alors l'intensité I du courant débité par la machine, ainsi que la différence de potentiel aux balais E . On répétera ces mesures pour différentes valeurs de la résistance que l'on a mise dans le circuit induit, et l'on construira la courbe des valeurs de E en fonction de I .

Calage des balais. — Dans ces expériences, on devra toujours placer les balais dans une position telle qu'il ne se produise pas d'étincelles.

On reconnaîtra que cette position avance dans le sens du mouvement à mesure que l'intensité du courant augmente — et que ce déplacement a pour conséquence une diminution de la différence de potentiel aux balais.

Réaction d'induit. — Déterminer la résistance de l'*induit* en mesurant la différence de potentiel aux balais quand on envoie un courant d'intensité connue dans l'induit sans lui permettre de tourner.

Calculer la perte de tension (IR) qui est due à cette résistance dans les mesures que nous venons de faire sur la machine en charge et ajouter cette perte de tension à la différence de potentiel aux balais. La somme obtenue, qui est la force électromotrice totale de la machine, est toujours plus petite que la force électromotrice à vide.

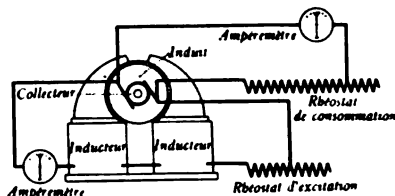
C'est la différence entre ces deux valeurs que l'on appelle *réaction d'induit*. Cette quantité croît avec l'intensité du courant ; on en construira la courbe représentative (172 bis).

181. Caractéristique en charge avec excitation en dérivation (1). — Disposer le circuit des inducteurs de la ma-

(1) Nous supposons qu'il s'agit d'une machine dont le montage normal est précisément le montage en dérivation. On pourrait faire une étude analogue avec une *machine série*.

chine génératrice en dérivation sur l'induit et placer un rhéostat et un ampèremètre dans ce circuit d'excitation. Mettre la machine en marche à la vitesse convenue et amener la tension à sa valeur normale par le réglage du rhéostat d'excitation.

Faire débiter à la machine des courants de plus en plus intenses,



sans modifier le circuit d'excitation, et en opérant toujours avec la même vitesse.

Mesurer simultanément l'intensité du courant principal et celle du courant d'excitation, ainsi que la différence de potentiel aux balais pour chacun des régimes de la machine.

On construira la courbe représentant les variations de force électromotrice en fonction de l'intensité du courant utile fourni par la machine. On notera, en particulier, que, lorsqu'on diminue progressivement la résistance extérieure, on trouve une valeur critique en dessous de laquelle la machine se désamorce.

Réaction d'induit. — Calculer ensuite pour chaque expérience la perte $R(I + i)$ causée par la résistance de l'induit et ajouter cette quantité à la différence de potentiel mesurée. La somme reste inférieure à la force électromotrice de la machine marchant à vide avec l'excitation employée. L'écart représente la *réaction d'induit* (172 bis).

182. Excitation composée. — Reprendre les expériences que nous venons d'indiquer sur la machine excitée en dérivation. Dans chacune de ces expériences, agir maintenant sur le rhéostat d'excitation pour rétablir entre les balais la différence de potentiel normale, malgré le passage du courant.

Construire la courbe représentant l'augmentation du courant d'excitation en fonction du courant utile. Dédire de la forme de cette courbe le nombre de tours que devrait faire autour des inducteurs un enroulement auxiliaire traversé par le courant principal, si l'on voulait arriver à ce que la différence de potentiel aux balais fût indépendante de l'intensité.

Réaliser ensuite ce montage (1) et s'assurer de l'efficacité de la correction réalisée.

183. Machine magnéto actionnée à la main. — Montrer que la force électromotrice de la machine marchant à vide est presque exactement proportionnelle à la vitesse. Constater la dépense de travail mécanique quand le circuit est fermé. Etudier la différence de potentiel aux balais en fonction de l'intensité du courant et déterminer la réaction d'induit (**VII, 181**).

— On étudiera aussi cet appareil en le faisant fonctionner comme moteur (2). On pourra effectuer toutes les expériences que nous avons indiquées pour une machine dynamo (**VII, 180**) à l'exception de celles où l'on doit faire varier l'excitation.

Force contre-électromotrice. — Mettre un voltmètre ou une lampe à incandescence en dérivation sur l'anneau. Placer ensuite cet anneau, avec un ampèremètre, dans un circuit contenant une source d'électricité capable d'entraîner la machine ; mais retenir tout d'abord mécaniquement cette machine pour l'empêcher de tourner.

Que se passe-t-il quand on laisse la machine partir à vide sous l'action du courant moteur ? Que se passe-t-il si l'on entraîne mécaniquement la machine dans le même sens en la forçant à tourner de plus en plus vite ? Que se passe-t-il quand on agit mécaniquement sur la machine pour ralentir et arrêter son mouvement et pour la faire tourner ensuite en sens inverse (63, 126) ?

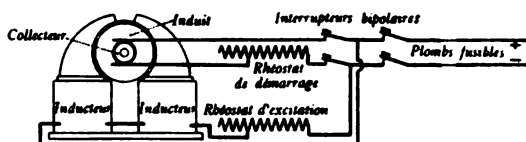
MOTEUR A COURANT CONTINU.

184. Etude du moteur marchant à vide. — *Montage.* — Nous supposerons qu'il s'agisse d'un moteur à excitation indépendante. Les dispositifs nécessaires pour le fonctionnement et la mise en route du moteur sont ceux que nous avons déjà indiqués (**VII, 178**). On mettra un voltmètre en dérivation entre les balais ; on placera un ampèremètre dans le circuit d'excitation et un autre dans le circuit de l'*armature*.

(1) L'enroulement auxiliaire doit être fait avec du fil assez gros pour que l'on puisse, en première approximation, négliger la perte due à son échauffement.

(2) Quelques laboratoires possèdent encore de vieilles machines d'induction à deux bobines avec redresseur de courant. Il n'est pas sans intérêt de signaler que l'on peut utiliser ces appareils comme moteurs en leur fournissant du courant électrique avec seulement deux ou trois éléments de pile Bunsen (59).

— Déterminer d'abord la résistance de l'anneau en y envoyant un fort courant sans exciter la machine. La résistance cherchée



est alors le quotient de la valeur de la différence de potentiel aux balais par la valeur de l'intensité du courant.

Ceci fait, donner d'abord à l'excitation sa valeur minima, mettre le moteur en marche et amener ce moteur à sa vitesse normale en agissant sur son rhéostat de démarrage (**VII, 178**).

Force contre-électromotrice d'induction. — Déterminer l'excès de la différence de potentiel aux balais sur la chute de tension (RI), d'ailleurs très faible, qui est due à la résistance de l'anneau : la différence représente la *force contre-électromotrice d'induction*.

Répéter cette détermination pour des valeurs croissantes de l'excitation en opérant toujours avec la même vitesse et construire la courbe des variations de la force contre-électromotrice d'induction en fonction des valeurs de l'excitation (¹).

Cette courbe doit être presque identique à la courbe *caractéristique à circuit ouvert* ou *courbe d'aimantation* de la machine fonctionnant comme génératrice (**VII, 179**), car la réaction d'induit est très faible dans la marche à vide du moteur.

Variations de vitesse. — Garder les dispositifs des expériences précédentes, mais opérer constamment avec l'excitation normale, et faire varier progressivement la vitesse en agissant sur le rhéostat de démarrage.

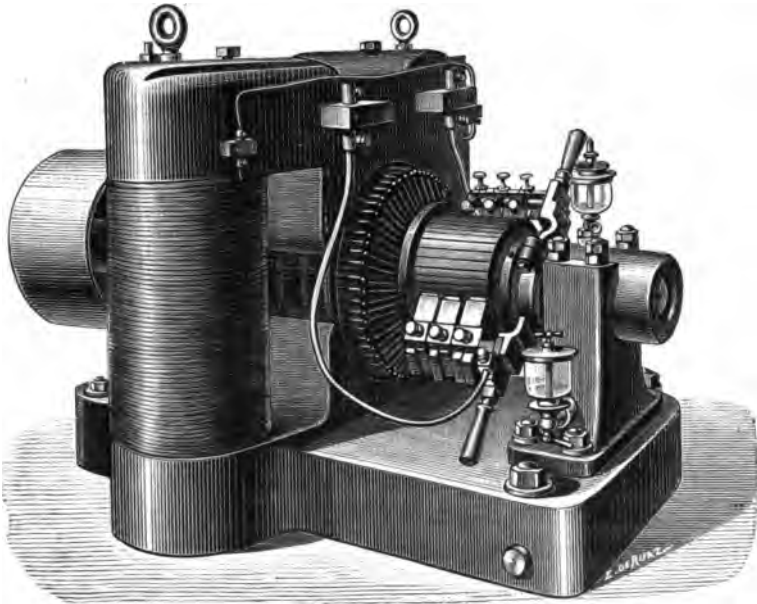
Construire une courbe représentant les variations correspondantes de la vitesse et de la *force contre-électromotrice d'induction*, que nous venons d'apprendre à déterminer. Cette courbe est presque exactement rectiligne.

(¹) Il vaut mieux prendre pour ordonnée le quotient de la force contre-électromotrice par la vitesse (nombre de tours par seconde). S'il y a, en effet, des petites variations de vitesse, ces variations n'influeront pas sensiblement sur la courbe obtenue, puisque la force contre-électromotrice est presque exactement proportionnelle à la vitesse.

— On pourra encore opérer à excitation variable et à force contre-électromotrice constante.

On représentera ces nouvelles expériences par une courbe dont les coordonnées seront, d'une part, le nombre de tours par seconde, et, d'autre part, le quotient de la force contre-électromotrice par le nombre de tours à la seconde. Cette courbe devra reproduire la *courbe d'aimantation* que nous avons obtenue tout à l'heure (172 bis).

185. Mesure des pertes d'énergie dans la marche à vide. — Le moteur marchant à vide à une certaine vitesse et avec une excitation déterminée, on mesure les valeurs de la différence de potentiel aux balais et de l'intensité du courant. Le produit de ces deux nombres mesure la puissance fournie à l'induit. On retranche de cette quantité la puissance (RI^2) dissipée sous



forme d'échauffement du cuivre, et le résultat représente l'ensemble des pertes dues aux frottements, aux courants induits dans les masses métalliques et à l'hystérésis du fer.

Influence des variations de vitesse. — Augmenter progressivement la vitesse en laissant l'excitation constante et étudier comment varie l'ensemble des pertes d'énergie calculées pour un tour de la machine, c'est-à-dire le rapport de la puissance dissipée et du

nombre de tours à la seconde. On trouvera que cette perte est à peu près constante.

La courbe représentative monte cependant un peu, et à peu près suivant une ligne droite, comme on devait s'y attendre, puisque les courants induits dans les masses mobiles sont à peu près proportionnels à la vitesse.

Influence des variations du champ magnétique. — Etudier ensuite comment varient les pertes quand on augmente le courant d'excitation en laissant la vitesse constante.

En conservant le même mode de représentation que dans les expériences précédentes, on devrait construire la courbe représentative en prenant pour coordonnées la perte d'énergie *par tour* et le quotient de la force contre-électromotrice par le nombre de tours à la seconde puisque c'est cette quantité qui mesure le champ magnétique dans lequel on opère. Il est évident qu'à l'échelle près, il sera exactement équivalent de prendre comme coordonnées la *puissance* dissipée et la force contre-électromotrice elle-même.

Les variations observées seront dues aux seuls phénomènes d'ordre magnétique, car les frottements mécaniques restent très sensiblement les mêmes.

186. Mesure du rendement d'un moteur au moyen de la mesure des pertes à vide. — Si l'on disposait de la puissance nécessaire pour mettre le moteur en marche au régime demandé, par exemple en pleine charge et sous l'excitation normale, on déterminerait d'abord le nombre de tours qu'il fait par seconde ainsi que la différence de potentiel aux balais et l'intensité du courant d'armature.

Le produit de ces deux derniers nombres serait la valeur de la puissance totale absorbée par le moteur, en ne tenant pas compte, pour le moment, de la dépense d'excitation. — Pour déterminer le rendement on devrait mesurer alors la puissance mécanique disponible sur l'arbre.

On peut remplacer ces *mesures* par une *évaluation* des pertes d'énergie. Cette évaluation se fait en mesurant les pertes dans le moteur fonctionnant à vide.

En dehors de la perte par échauffement (RI^2), qui se calcule à part, on peut admettre que les autres pertes restent les mêmes (¹)

(¹) Cette méthode serait mauvaise pour une machine où la *réaction d'induit* serait très grande.

dans les deux régimes auxquels la machine fonctionne, si l'on a soin d'opérer avec la même excitation (1) et la même vitesse (2).

La puissance dépensée dans cette marche à vide, diminuée de la puissance (RI^2) employée à l'échauffement du fil, représente, comme nous l'avons dit, la valeur des pertes dues aux frottements; aux courants induits dans les masses métalliques et à l'hystérésis du fer.

En ajoutant ces pertes à la puissance (RI^2) qui, dans la première expérience, se dissipe par l'échauffement du cuivre de l'armature, on aura la totalité des pertes dans la partie mobile de la machine. Tenant compte, enfin, de la dépense d'excitation, on aura tous les éléments nécessaires pour calculer le rendement (172 bis).

187. Rendement de la machine fonctionnant comme génératrice. — Les expériences se font d'une façon analogue.

Pour déterminer les pertes, on évalue la puissance (RI^2) dépensée pour l'échauffement du cuivre des inducteurs et de l'induit, et l'on y ajoute les pertes de la machine *marchant à vide comme moteur*, pour les mêmes valeurs de la vitesse et du champ magnétique.

On calcule ensuite la puissance électrique (EI) qui serait fournie par la machine dans les conditions proposées; et l'on en déduit le rendement.

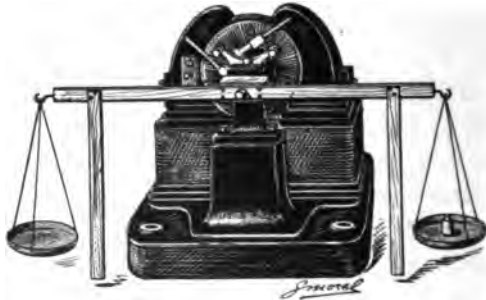
188. Dynamo-frein et moteur taré. — Nous venons d'indiquer les expériences qui font connaître le rendement d'une machine fonctionnant comme moteur ou comme génératrice sous un régime donné. Si l'on détermine ces rendements pour différentes puissances, mais à *vitesse et excitation constantes*, on trouve que la puissance est une fonction linéaire du courant d'armature, *la courbe représentative est une droite*, soit que la machine fonctionne comme moteur, soit qu'elle fonctionne comme génératrice.

(1) On devrait en réalité opérer dans le même champ magnétique. L'excitation devrait donc être celle pour laquelle on trouve la même valeur à vide qu'en charge pour la force contre-électromotrice. Si la vitesse n'était pas exactement la même dans les deux expériences, c'est le quotient de la force contre-électromotrice par le nombre de tours à la seconde qu'on devrait ramener à la même valeur.

(2) On peut remarquer qu'il n'est pas nécessaire de reprendre *exactement* la même vitesse. Les pertes à vide sont, en effet, à très peu près proportionnelles à la vitesse (VII, 185) et l'on peut tenir compte de l'écart par une simple proportion.

Ayant déterminé cette droite au moyen de deux mesures de rendement on construira un tableau sur lequel on inscrira directement la puissance en kilowatts ou en chevaux-vapeur en face des valeurs du courant d'armature (172 bis).

189. Mesure du couple et des frottements dans le moteur immobilisé. — *Montage.* — Fixer sur l'arbre du moteur une épaisse plaque de bois dans laquelle cet arbre entre à frottement très dur. Visser sur cette plaque une planche étroite et longue (80^{cm}; 3^{cm}; 1^{cm}) terminée par des crochets auxquels on suspend des plateaux de façon à constituer une sorte de balance.



Pour empêcher le fléau de tourner, tout en lui laissant la liberté de s'incliner un peu à droite ou à gauche, on fixe aux deux bouts de ce fléau des planchettes verticales (2^{cm} × 1^{cm}) qui descendent jusqu'à environ 1^{cm} de la table d'expériences.

Expériences. — Envoyer d'abord dans l'armature et dans les inducteurs les courants maxima qu'ils auront à supporter. Le fléau culbute dans un certain sens; on met alors sur la balance une tare suffisante pour ramener le fléau en arrière. La tare qu'on vient de déterminer sera laissée dans le plateau, et demeurera invariable pendant toutes les mesures qui vont suivre.

Ayant supprimé tout courant, on cherche à équilibrer la tare en mettant des poids dans l'autre plateau. On trouve deux charges voisines pour lesquelles le fléau est entraîné de gauche à droite ou de droite à gauche. La différence de ces deux charges correspond aux frottements mécaniques; leur valeur moyenne correspond à l'équilibre, abstraction faite des frottements.

Établir ensuite un régime déterminé et chercher de nouveau à rétablir l'équilibre. Prendre encore la moyenne des deux charges qui font pencher le fléau à droite et à gauche. La différence de

cette charge moyenne et de la charge moyenne mesurée à vide étant ensuite multipliée par la longueur du bras de levier donne la valeur du *moment* du couple à mesurer.

Influence du courant d'armature. — En opérant à excitation constante, on trouvera un couple moteur à peu près proportionnel à l'intensité du courant d'armature.

Influence de l'excitation. — En opérant avec un courant invariable dans l'armature, le couple est proportionnel au champ magnétique. Ses variations en fonction de l'excitation doivent donc être représentées par la *courbe d'aimantation* (VII, 179 et 184), si nous supposons que la réaction de l'induit sur le champ est faible.

Influence du calage des balais. — Dans ce qui précède, nous avons supposé les balais sur la ligne neutre.

On étudiera les variations du couple moteur pour toutes les positions que peuvent prendre les balais en tournant autour de l'axe et l'on construira la courbe représentative.

Cette courbe présente un maximum pour le calage dans la ligne neutre, et elle est à peu près rectiligne vers le calage à angle droit de celui-ci, là où le couple s'annule et change de sens.

190. Étude du moteur en charge. — Pour charger le moteur, on l'emploie à entraîner une machine dynamo génératrice (VII, 178). On peut alors faire varier la charge à volonté en modifiant la valeur de la résistance dans laquelle on absorbe le courant fourni par la génératrice (VII, 177).

Influence de la charge sur le régime d'un moteur excité en dérivation. — Mettre le moteur en marche sous une charge très faible et supprimer alors la résistance de démarrage du moteur, afin que l'armature soit alimentée directement par la source d'électricité.

Nous supposerons que cette source soit à potentiel constant.

Charger ensuite progressivement le moteur sans changer son excitation. Ce moteur se ralentit et, en même temps, l'intensité du courant qui passe dans l'armature augmente (1).

(1) Aux faibles charges la vitesse est presque rigoureusement la même qu'à vide quand, comme ici, on opère à *excitation et à tension constantes*. Aussi le moteur électrique est-il excellent pour faire tourner à une vitesse déterminée des appareils qui ne demandent que peu de puissance, tels que des sirènes, des commutateurs, etc. — Mais il est bien entendu qu'il ne doit pas y avoir de rhéostat

On construira les courbes représentant les variations simultanées de ces deux quantités et de la puissance électrique (EI) fournie au moteur.

Réaction d'induit. — Ayant mesuré la différence de potentiel aux balais pour les différentes charges, on en retranche à chaque fois la perte de force électromotrice (IR) due au passage du courant dans l'armature. La force contre-électromotrice d'induction ainsi trouvée est plus petite que la force contre-électromotrice que l'on obtenait, à vide, pour la même vitesse et la même excitation. L'écart correspond à la *réaction d'induit*.

Régularisation de la vitesse. — Étudier le moteur sous des charges croissantes et maintenir la vitesse constante en agissant sur l'excitation.

Construire la courbe des intensités du courant d'excitation en fonction du courant d'armature. Cette courbe est-elle à peu près rectiligne?

Aurait-on pu maintenir la vitesse à peu près constante en laissant l'excitation invariable, mais en mettant sur les inducteurs un enroulement supplémentaire à gros fil dans lequel on aurait envoyé le courant d'armature (172 bis)?

191. Étude d'un compteur. — Supposons qu'il s'agisse d'un compteur formé d'un moteur sans fer entraînant un disque qui tourne dans un champ magnétique permanent. Le moment du couple moteur est proportionnel au produit des intensités de courant dans les inducteurs (ampères) et dans l'anneau (volts). Le moment du couple résistant, qui lui est égal, est dû aux courants induits dans le disque amortisseur; il est donc proportionnel à la vitesse.

On vérifiera qu'à *tension* constante le nombre de tours que le disque fait par minute est proportionnel à l'intensité du courant d'excitation, et qu'à *intensité* constante, cette vitesse est proportionnelle à la différence de potentiel.

— On peut étalonner cet appareil en lui faisant mesurer l'énergie que dépense un courant permanent sur une résistance connue. Il suffit alors de mesurer l'intensité du courant.

dans le circuit d'armature. On reconnaîtra que la vitesse deviendrait tout à fait irrégulière si l'on augmentait la force électromotrice placée dans ce circuit et si l'on essayait de compenser cette augmentation de force électromotrice par l'introduction d'une résistance.

— On remarquera que toutes ces expériences peuvent se faire en courants alternatifs comme en courants continus.



COURANTS ALTERNATIFS.

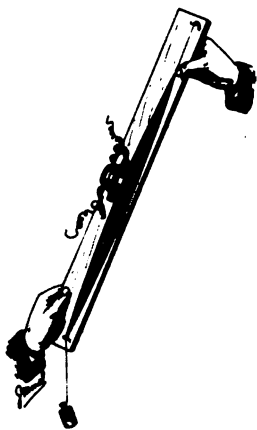
192. Expériences qualitatives. — Un courant alternatif ne produit pas de déviation permanente dans un ampèremètre à cadre mobile ni dans un ampèremètre à aimant fixe et à ailette de fer doux. On voit seulement l'aiguille indicatrice vibrer autour du zéro (¹). — Un courant alternatif traversant un voltamètre ne produit pas d'électrolyse visible si son intensité est faible ; mais, si l'on force l'intensité, on obtient du *gaz tonnant* aux deux électrodes — Si l'on monte une sonnerie électrique en appel à un coup (VII, 146), et si l'on y envoie un courant alternatif, la sonnerie fonctionne continuellement. — Un courant alternatif agit sur un électrodynamomètre (VII, 162) comme un courant continu. — Le courant alternatif chauffe les conducteurs comme le fait le

(¹) Si le courant alternatif est très intense l'organe mobile peut subir une déviation permanente par suite des courants qui s'y développent par induction et qui sont repoussés par le courant qui passe dans les parties fixes de l'appareil.

courant continu. On peut s'en servir pour alimenter une lampe à incandescence ou une lampe à arc.

193. Mesure de la période d'un courant alternatif. —

Prendre un électro-aimant de sonnerie et l'attacher vers le milieu d'une règle de bois (50^{cm}; 5^{cm}; 1^{cm},5). Visser des anneaux aux bouts de cette règle. Fixer un fil de fer fin ($l = 60^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{mm}},025$) dans l'un des anneaux, le faire passer dans l'autre anneau et le tendre par un poids de 200^{gr}.



L'appareil sera réglé de façon qu'en le tenant un peu incliné, le fil de fer s'appuie sur les deux anneaux et passe à environ 1^{cm} de l'électro-aimant.

Envoyer le courant alternatif dans l'électro-aimant, en même temps que dans une lampe à incandescence, ou dans toute autre résistance suffisante pour réduire l'inten-

sité à une fraction d'ampère.

Le fil de fer est attiré deux fois par période. Ces attractions n'étant pas nécessairement synchrones des vibrations propres du fil, l'amplitude du mouvement obtenu est en général assez faible.

Passer alors le doigt le long du fil pour diminuer la longueur de la partie qui vibre, et chercher la longueur pour laquelle la résonance a lieu. L'amplitude devient alors considérable. Mesurer à ce moment la longueur utile l du fil.

Si l'on a déterminé d'autre part la masse m de l'unité de longueur du fil et si l'on représente par F la valeur du poids tenseur ($F = Mg$), la période des oscillations propres du fil est

$$2l\sqrt{\frac{m}{F}}$$

La période du courant alternatif est *le double* de cette quantité (1).

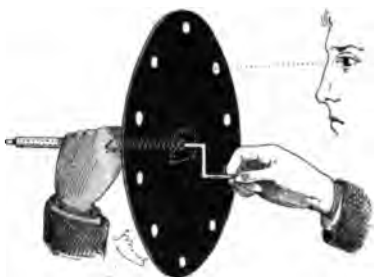
Procédé stroboscopique. — Quand le courant alternatif alimente un arc, ou même une lampe à incandescence à fil fin, on peut

(1) Les dimensions indiquées conviennent pour des périodes de l'ordre du quarantième de seconde.

compter les périodes en comptant les variations d'éclat de la source.

On pourrait se faire une idée de la fréquence en déplaçant simplement une baguette brillante dans le champ lumineux. Mais on obtient une véritable mesure en observant la source à travers un disque noir percé d'une vingtaine de trous équidistants qu'on fait tourner à la main (V, 36).

Si la période du passage des trous est égale à la période du courant, la source lumineuse apparaît avec un aspect invariable. Si l'on n'est pas au synchronisme, sans cependant en être trop loin, on observe, au contraire, des variations d'éclat. On cherchera donc à établir le synchronisme en immobilisant de préférence l'apparence que présente la source quand elle vient de s'éteindre et qu'elle commence à se rallumer.



Pendant que l'on tourne ainsi le disque à vitesse constante, un aide détermine le nombre de tours que le disque fait dans une minute. Il est ensuite facile de déduire de ce nombre la valeur de la période du courant.

— Pour projeter l'expérience, on place le disque interrupteur immédiatement devant l'arc. L'expérience est particulièrement nette si l'on se sert d'un moteur synchrone entraîné par le courant alternatif et portant un disque à une seule fente.

194. Production des courants alternatifs. — On peut produire des courants alternatifs avec une machine dynamo à courants continus.

On monte sur l'arbre deux anneaux métalliques continus, isolés de la masse, et on les relie par des fils de cuivre à deux points diamétralement opposés de l'enroulement induit. Des balais frottent sur ces anneaux et recueillent les courants alternatifs.

— La période des courants alternatifs que l'on obtient ainsi est nécessairement égale à la période de rotation de l'induit. On peut faire tourner cet induit à une vitesse plus grande que sa vitesse normale si l'on a eu soin de l'équilibrer.

Dans ce but, ayant démonté la machine, on fait reposer les bouts de l'axe sur deux règles de fer parallèles et bien horizon-

tales. Tant que l'induit n'est pas équilibré, il oscille comme un pendule. On ramène le centre de gravité sur l'axe au moyen d'une petite masse de plomb qu'on fixe à l'intérieur de l'anneau.

Courants triphasés. — On produit des *courants triphasés* en



montant sur l'axe trois bagues isolées reliées à trois points également espacés sur la circonférence de l'anneau.

195. Transformation mutuelle des courants continus et des courants alternatifs monophasés. — Pour une installation importante, le mieux est d'employer un moteur électrique attelé à une génératrice.

Dans un laboratoire on peut se servir, comme *transformatrice*, d'une machine dynamo munie de bagues supplémentaires comme nous l'avons fait pour la production des courants alternatifs (**VII, 194**).

Si l'on fait tourner la machine au moyen du courant continu (**VII, 178**), cette machine transforme le courant, et les balais supplémentaires fournissent du courant alternatif.

— La transformation inverse se fait en entraînant la machine par le courant alternatif de façon à la faire fonctionner comme *moteur synchrone*. On recueille alors du courant continu sur le collecteur.

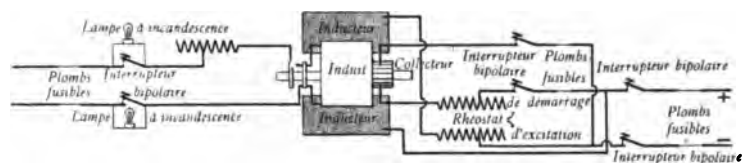
Pour mettre en route, on fait démarrer sur courants continus par le dispositif ordinaire (**VII, 178**) et l'on cherche à atteindre la vitesse qui correspond à la période des courants alternatifs. On agit pour cela, comme nous le savons, sur le rhéostat de démarrage et sur le rhéostat d'excitation (*fig.* p. 383).

Pour pouvoir reconnaître l'instant du synchronisme, on laisse constamment le circuit alternatif fermé sur la machine par l'intermédiaire de deux lampes à incandescence montées en dérivation sur l'interrupteur *bipolaire*.

Quand on s'approche du synchronisme, les variations d'éclat de ces lampes deviennent de plus en plus lentes, puisqu'elles s'allument lorsque les forces électromotrices s'ajoutent et qu'elles

s'éteignent quand les forces électromotrices sont en opposition.

Au moment où, les variations étant devenues très lentes, les



lampes se trouvent à leur *minimum* d'éclat, on fait brusquement l'*accrochage* du moteur en coupant le courant continu et en mettant, en même temps, les deux lampes à incandescence en court-circuit. Le moteur continue alors à tourner en se fournissant lui-même son courant d'excitation.

Démarrage en moteur série. — L'effort moteur exercé sur l'induit d'une *machine série* ne dépend pas du sens du courant. Pour faire démarrer de très petits moteurs, on peut donc monter les inducteurs et l'induit en série et les alimenter directement avec le courant alternatif.

196. Forces exercées sur un conducteur placé dans un champ magnétique alternatif. — Quel que soit le conducteur étudié, la self-induction fait que les variations du courant induit sont en retard sur les variations du flux magnétique. Il en résulte que ce conducteur tend à se déplacer vers le côté où les variations de flux sont moindres.

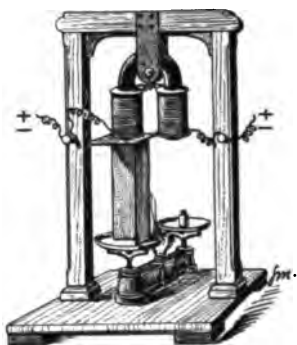
— Une plaque de cuivre rouge (3^{cm} ; 3^{cm} ; $0^{\text{cm}},4$) est suspendue verticalement par un fil de soie très fin (soie à dentelle). On l'approche d'un électro-aimant (**VII, 143**) actionné par du courant alternatif. La plaque de cuivre s'oriente alors dans la direction des lignes de force.

L'expérience réussit avec un simple électro-aimant de sonnerie en forçant un peu le courant. On peut même créer le champ magnétique alternatif avec une bobine plate sans fer ($D = 10^{\text{cm}}$) formée par une centaine de tours de fil ($d \geq 0^{\text{cm}},05$) dans laquelle on envoie un courant alternatif de l'ordre de l'ampère.

— Découper une plaque de cuivre rouge (8^{cm} ; 8^{cm} ; $0^{\text{cm}},4$). Faire porter cette plaque par une balance, la placer sous l'un des pôles d'un fort électro-aimant (**VII, 143**) et établir l'équilibre (*fig.* p. 384).

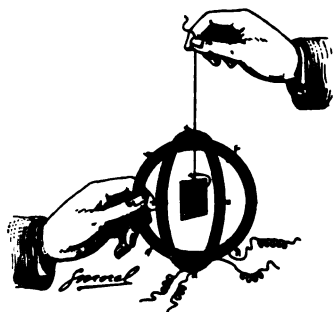
· Quand on envoie un courant alternatif dans l'électro-aimant, la

plaque de cuivre est repoussée avec une force qui peut atteindre une centaine de grammes.



— Dans toutes ces expériences, il faut éviter de laisser passer le courant trop longtemps dans l'électro-aimant, parce que la répétition des cycles d'aimantation et les courants induits dans la masse échauffent rapidement le fer.

197. Principe des moteurs à champ tournant. — Pré-



parer deux bobines plates ($D = 10^{\text{cm}}$) d'une centaine de tours de fil ($d \geq 0^{\text{mm}}, 05$). Faire entrer l'une de ces bobines à angle droit dans l'intérieur de l'autre, en les déformant un peu, et suspendre au milieu de l'appareil une plaque de cuivre ($3^{\text{cm}}; 3^{\text{cm}}; 0^{\text{mm}}, 4$) attachée à un fil très fin (soie à dentelle).

Envoyer alors un courant alternatif dans l'une des bobines, puis dans l'autre, et, enfin, dans les deux à la fois. On verra la plaque de cuivre se placer d'abord perpendiculairement aux bobines, puis à 45° de leur direction.

Disposer ensuite les deux bobines plates dans deux circuits montés en dérivation et alimentés par le courant alternatif.

Le premier circuit contient l'une des bobines et un rhéostat, le second circuit contient l'autre bobine et une forte self-induction, un électro-aimant, par exemple (**VII, 143**).

Régler les choses de façon que l'intensité du courant soit à peu

près la même dans les deux circuits et envoyer un courant de 1 ou 2 ampères dans l'appareil. La plaque de cuivre suspendue dans le champ magnétique se met alors à tourner de plus en plus vite pour suivre la rotation du champ.

La rotation change de sens si l'on inverse le courant dans l'une ou l'autre des deux bobines.

— Si l'on place une boussole dans le champ tournant, l'aiguille aimantée, comme la plaque de cuivre, est d'abord entraînée par les courants induits qui s'y développent, puis elle s'accroche dans le champ magnétique et tourne ensuite synchroniquement avec le champ.

TRANSFORMATEURS.

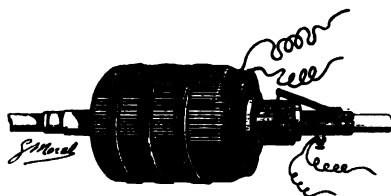
198. Construction d'un transformateur. — On trouve dans l'industrie, à très bas prix, des transformateurs à circuit ma-



gnétique fermé, à partir d'une puissance de quelques hectowatts, fonctionnant sur 110 volts avec un rapport de transformation de $\frac{1}{4}$ ou de $\frac{2}{3}$.

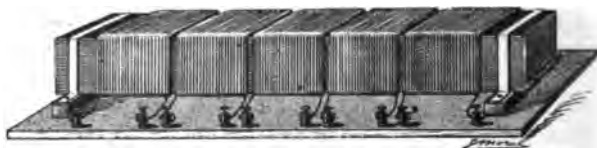
— On peut se servir comme transformateur d'un *anneau de machine gramme*, dont on coupe l'enroulement en un point. Le circuit inducteur comprend un certain nombre de sections de l'anneau à partir de la coupure, et le circuit induit est formé par les sections restantes. Le rapport de transformation peut être choisi arbitrairement puisque l'on peut choisir à volonté le point où les deux circuits se raccordent. Ce point, quel qu'il soit, commu-

nique avec une touche du collecteur; c'est donc sur le collecteur que se fera la prise de courant commune, comme le montre la figure.



— On peut construire soi-même un transformateur d'étude à circuit magnétique ouvert (1).

Faire découper 100 tôles de fer mince (80^{cm}; 7^{cm}; 0^{cm},05) et enlever soigneusement à la lime les inégalités qui peuvent rester



sur les arêtes. Faire un paquet solidement attaché avec toutes ces tôles placées les unes sur les autres, et séparées par des feuilles de papier de soie.

Prendre du fil de cuivre ($d = 0^{\text{cm}},2$) isolé au coton et l'enrouler autour du noyau de fer en spires serrées qui en couvrent presque toute la longueur. Cet enroulement est partagé en cinq sections formées exactement du même nombre de tours.

On fait aboutir les deux extrémités de chaque section à des bornes indépendantes, afin de pouvoir grouper à volonté ces sections pour constituer le primaire et le secondaire du transformateur.

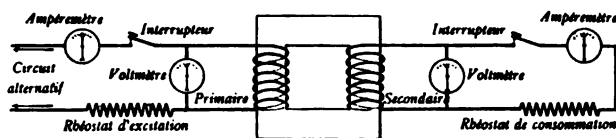
199. Étude d'un transformateur. — Mettre un rhéostat non inductif, un ampèremètre et un interrupteur dans chacun des deux circuits et disposer un voltmètre pour prendre la différence de potentiel aux bornes des circuits primaire et secondaire.

Si les ampèremètres sont *shuntés*, ce qui est le cas des appa-

(1) Les transformateurs à circuit magnétique ouvert sont plus lourds et ont un rendement moindre que les transformateurs à circuit magnétique fermé; mais ils sont très faciles à construire. Le modèle décrit n'a guère qu'un rendement d'environ 90 pour 100 pour une puissance de 1 kilowatt. Si l'on consentait à augmenter la dépense de cuivre, on pourrait cependant diminuer les pertes en mettant deux couches de fil.

reils thermiques, on peut se servir du même appareil de mesure pour le primaire et pour le secondaire; ce sont alors seulement les *shunts* qui restent en permanence dans les deux circuits.

Si l'on dispose d'un wattmètre (VII, 163) ou d'un compteur (VII, 191), on le place dans le circuit primaire.



Rapport des intensités. — Faire croître progressivement la charge du transformateur en diminuant la résistance du secondaire. Maintenir cependant constante la différence de potentiel aux bornes du primaire par l'action du rhéostat.

Comment varie l'intensité secondaire en fonction de l'intensité primaire? Les deux intensités sont-elles proportionnelles (1) et sont-elles dans le rapport des nombres de tours des deux circuits?

Que se passe-t-il si l'on change le groupement des *sections* du transformateur? Peut-on mettre deux *sections* en parallèle sans risquer la production d'un court-circuit?

Rapport des différences de potentiel. — Laisser le secondaire ouvert et faire varier la différence de potentiel aux bornes primaires par l'action du rhéostat.

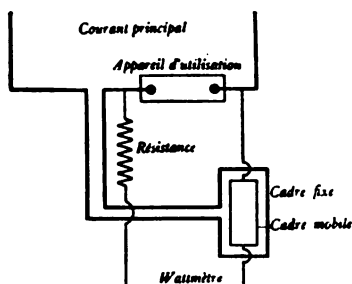
Comment varie la force électromotrice secondaire? La courbe représentative a-t-elle la même allure générale que les courbes d'aimantation du fer? La proportionnalité des forces électromotrices aux nombres de tours est-elle plus approchée que pour les intensités? Que se passe-t-il quand on change le groupement des *sections* du transformateur? Peut-on mettre le secondaire en tension avec le primaire et ajouter ainsi leurs forces électromotrices dans un même circuit?

200. Mesure du rendement d'un transformateur. —

Quand on dispose d'une puissance suffisante, on actionne le transformateur à pleine charge en le faisant débiter sur un rhéostat non inductif (VII, 80 et 177).

(1) La proportionnalité est plus exacte entre l'intensité secondaire et la racine carrée de la différence entre le carré de l'intensité primaire actuelle et le carré de l'intensité primaire du transformateur marchant à vide sous le voltage normal.

La puissance primaire est mesurée avec un wattmètre ou un



compteur et la puissance secondaire est déduite des mesures d'intensité et de différence de potentiel.

On reconnaîtra, dans ces mesures, que la valeur de la puissance primaire, déterminée au wattmètre, est toujours inférieure au produit du nombre de volts par le nombre d'ampères. L'écart diminue à mesure qu'on augmente la charge.

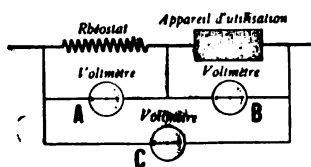
— Si l'on ne dispose pas de toute la puissance nécessaire pour charger le transformateur, on peut cependant se faire une idée de ce que serait le rendement du transformateur en pleine charge.

On mesure au wattmètre la dépense d'énergie du transformateur quand on le fait fonctionner à vide, en lui faisant donner cependant sa tension normale aux bornes du secondaire.

De la dépense mesurée, on retranche la puissance (RI^2), d'ailleurs assez faible, dépensée sous forme de chaleur dans le circuit primaire.

La différence représente les pertes dans le fer et l'on peut admettre qu'elles resteraient à peu près les mêmes en pleine charge. Le rendement du transformateur se calcule alors approximativement en ajoutant aux pertes dans le fer ainsi évaluées les pertes (RI^2) qui se produisent en charge en raison de la résistance des deux circuits.

Mesure de la puissance par le procédé des trois voltmètres. —



A défaut de wattmètre ou de compteur on mesure la puissance dépensée dans le transformateur par le *procédé des trois voltmètres*.

Le circuit primaire contient une résistance non inductive. On lui donne une valeur telle que la différence de potentiel A entre ses

extrémités soit du même ordre de grandeur que la différence de potentiel B aux bornes du primaire.

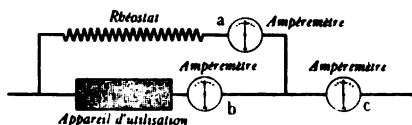
On mesure séparément ces deux différences de potentiel et l'on mesure aussi la différence de potentiel totale. La valeur trouvée C est, en général, inférieure à la somme A + B. Le quotient

$$\cos \varphi = \frac{C^2 - A^2 - B^2}{2AB}$$

est le *facteur de puissance* du circuit. La puissance dépensée (EI cos φ) est alors représentée par l'expression

$$\frac{C^2 - A^2 - B^2}{2R}.$$

— Le procédé précédent suppose que l'on dispose d'un excès de tension. S'il n'en est pas ainsi et si l'on dispose au contraire d'un excès de courant on emploie le *procédé des trois ampèremètres*



On met un rhéostat en dérivation sur l'appareil d'utilisation et l'on mesure les intensités a et b des deux courants dérivés ainsi que l'intensité totale c. Le facteur de puissance et la puissance ont alors respectivement pour expressions

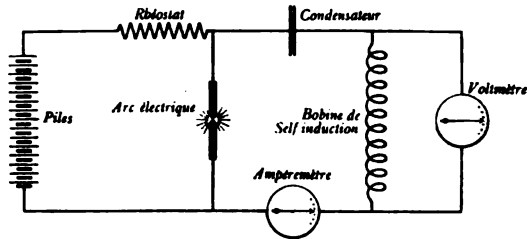
$$\frac{c^2 - a^2 - b^2}{2ab} \quad \text{et} \quad \frac{r(c^2 - a^2 - b^2)}{2}.$$

OSCILLATIONS ÉLECTRIQUES.

201. Arc chantant. — Disposer un arc électrique avec un rhéostat dans un circuit qui sera alimenté, de préférence, par du courant continu. Mettre en dérivation sur l'arc électrique un deuxième circuit comprenant un condensateur, une self-induction et un ampèremètre thermique.

Si l'on a pris des *charbons durs sans mèche*, quand on allume l'arc on entend un sifflement d'une hauteur bien déterminée et

l'ampèremètre indique qu'un courant alternatif traverse le circuit dérivé. En désignant par C la capacité et par L le coefficient de self-



induction du circuit, la période des oscillations a approximativement pour valeur

$$2\pi\sqrt{CL}.$$

Le son est d'autant plus grave que la bobine de self-induction est plus grosse et que la capacité est plus grande.

On peut se contenter de la self-induction constituée par 1^{ks} de fil isolé enroulé sur sa bobine, et l'on peut prendre comme capacité un microfarad seulement. Le son est alors un sifflement assez aigu.

Le régime oscillatoire n'est pas très stable. On le maintient en réglant à la main l'écartement des charbons.

Il faut aussi agir sur la résistance du circuit principal, et chercher par tâtonnements la valeur la plus avantageuse du courant. Avec une force électromotrice de 120 volts, on met de 5 à 10 ohms



dans le circuit, on obtient un courant principal d'une demi-douzaine d'ampères, et un courant alternatif qui peut être, lui aussi, de plusieurs ampères.

Mesure de la fréquence. — Mesurer la hauteur du son par

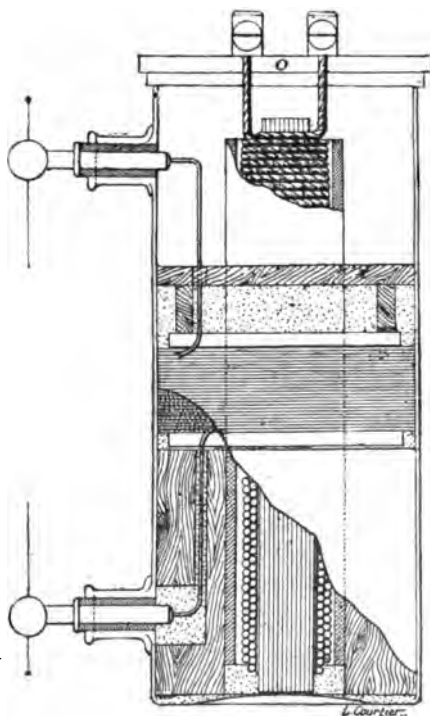
un procédé acoustique, en le comparant, par exemple, avec le son donné par une petite flûte.

Déterminer d'autre part l'intensité efficace I du courant alternatif et la différence de potentiel efficace E aux bornes de la bobine de self-induction. Ces deux mesures permettent de calculer approximativement le nombre des oscillations du courant ⁽¹⁾. La valeur trouvée concorde-t-elle avec celle qu'on déduit des mesures acoustiques ?

— On fera cette vérification pour différentes valeurs de la capacité.

HAUTE TENSION ET HAUTE FRÉQUENCE.

202. — Transformateurs à haute tension. — Lorsqu'on a

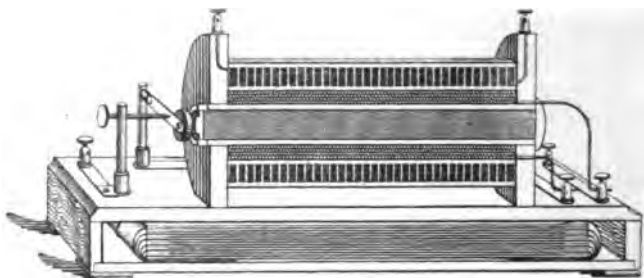


besoin de quelque puissance, et que l'on dispose de courants alter-

(¹) Cette valeur est $N = \frac{I}{2\pi CE}$.

natifs, on emploie des transformateurs (VII, 198) dont le secondaire est formé d'un très grand nombre de tours de fil et qui sont, seulement, très bien isolés.

— Pour les très faibles puissances et les très hauts voltages, on peut actionner le transformateur avec un courant continu qu'on rompt brusquement. Le circuit secondaire fournit alors des charges électriques à un haut potentiel (VII, 51).



Les bobines d'induction dites de Ruhmkorff ont un circuit secondaire formé de galettes plates noyées dans de l'arcanson. Le circuit inducteur est relié à un condensateur de grande capacité pour faciliter la rupture du courant primaire.

— A chaque rupture primaire, le circuit formé par l'enroulement inducteur et son condensateur est le siège d'oscillations électriques (VII, 201). Si ces oscillations ne sont pas très rapidement amorties par la résistance du circuit primaire et par la dissipation d'énergie dans le fer, elles agissent sur le secondaire et compliquent beaucoup les phénomènes en multipliant les décharges fournies par la bobine (149).

— On emploie souvent des bobines d'induction noyées dans l'huile ou dans un isolant de consistance pâteuse et dont l'enroulement secondaire, à fil très fin, est formé d'une seule galette placée au milieu du noyau magnétisant (*fig.* p. 391).

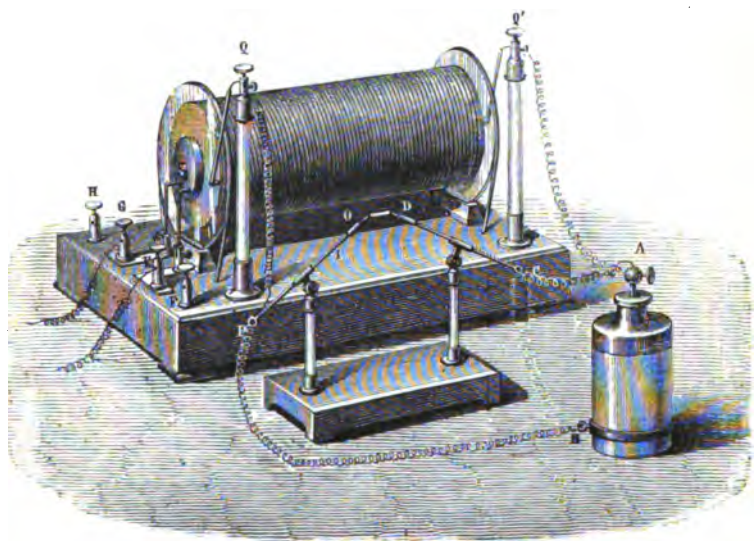
— On peut encore obtenir des courants à haute tension avec des machines électrostatiques (VII, 48), que l'on construit alors avec un grand nombre de plateaux pour augmenter leur débit.

203. Fractionnement de la décharge. Soufflage de l'arc. — Relier les deux armatures d'un condensateur aux pôles du circuit secondaire d'un transformateur à haute tension ou d'une bobine d'induction un peu forte. Mettre en dérivation sur le con-

densateur un excitateur dans lequel pourra passer l'étincelle secondaire. Éloigner d'abord les électrodes du déflagrateur à une distance que l'étincelle ne peut pas franchir. Rapprocher ensuite ces électrodes de plus en plus.

Tenir à la main un miroir plan dans lequel on puisse voir simultanément l'étincelle du déflagrateur et l'étincelle qui se produit à l'interrupteur de la bobine. En imprimant à ce miroir un léger mouvement de balancement on dissocie les images des deux étincelles et l'on peut se rendre compte de leur constitution. On devra observer les apparences suivantes :

Tout d'abord, quand la distance explosive est un peu grande,



chaque rupture du primaire est accompagnée d'une seule étincelle dans le circuit induit. Pour une plus petite distance explosive chaque étincelle primaire est accompagnée de deux étincelles secondaires, puis de trois, puis d'un plus grand nombre.

On évaluera l'énergie débitée par les groupes de décharges qui correspondent à une rupture primaire sous chacun des régimes, en se reportant aux valeurs des potentiels explosifs en fonction de la distance.

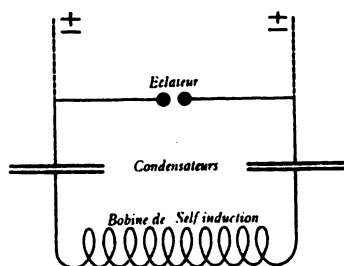
— Si l'on continue à rapprocher les électrodes du déflagrateur, et si la source d'électricité est assez puissante, les étincelles successives du déflagrateur sont remplacées par une flamme qui

semble persistante, mais qui, en réalité, s'éteint périodiquement et à même fréquence que le courant primaire.

Souffler alors sur cette flamme en y injectant de l'air au moyen d'un tube de verre ($D = 0^{\text{cm}}, 8$) : on pourra économiser beaucoup d'air en aplatissant l'extrémité du tube et en ne lui laissant qu'une ouverture étroite ($1^{\text{cm}}; 0^{\text{cm}}, 2$). L'effet de ce soufflage est d'éteindre l'arc et de faire revenir l'appareil au régime des décharges successives.

Le soufflage de l'arc est d'autant plus difficile que l'énergie mise en jeu est plus grande. Un soufflet de lampe d'émailleur (**V, 42**) suffit pour un appareil d'une puissance de *un kilowatt*.

204. Production des courants de haute fréquence. — Ce sont les courants produits par la décharge d'une capacité modérée dans un circuit de self-induction faible. Si la décharge est oscillante, sa période ($2\pi\sqrt{CL}$) peut alors être très courte ⁽¹⁾.



Le dispositif le plus commode pour la production de ces courants est celui que représente le diagramme ci-contre où les signes \pm représentent les pôles de la machine électrostatique ou du transformateur avec lequel on charge les condensateurs. Les oscillations se produisent dans le circuit formé

par les deux condensateurs en cascade, la bobine de self-induction et le déflagrateur où éclate l'étincelle de décharge.

Si l'on dispose d'une grande quantité d'énergie, on peut prendre des capacités formées d'un nombre suffisant de tôles de fer mince séparées par des feuilles de *micanite*. Le tout est noyé dans du pétrole pour assurer l'isolement ⁽²⁾ (**38 bis**).

Il est tout aussi économique de prendre des condensateurs à

⁽¹⁾ Quand la capacité et la self-induction ne sont pas très grandes, la résistance de l'étincelle empêche les oscillations de se produire, mais la décharge continue est alors extrêmement amortie et les effets d'induction qu'elle peut produire sont à peu près les mêmes que pour une décharge oscillante.

⁽²⁾ Un condensateur placé dans l'air chauffe fortement au bord des armatures en raison des aigrettes qui s'étalent sur le diélectrique; et cet échauffement favorise la rupture du diélectrique (**VII, 38**). Lorsque le condensateur est noyé dans un diélectrique liquide ou pâteux, ces aigrettes dangereuses se produisent plus difficilement.

tubes de verre extra-mince argentés. La figure ci-dessous donne l'aspect d'un condensateur à six tubes ($h = 50^{\text{cm}}$) dont la capacité est de *un dixième de microfarad*.



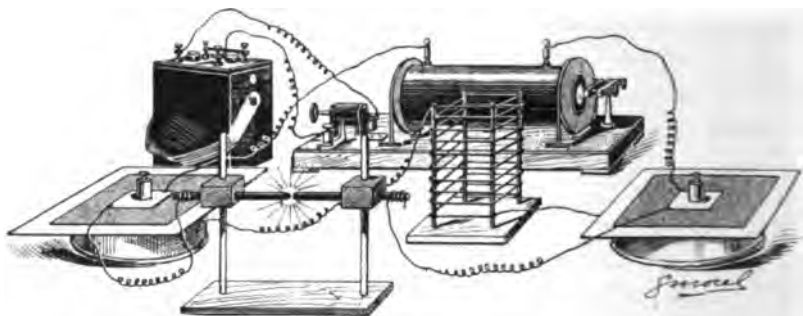
— Quand on opère en petit, avec une bobine de Ruhmkorff qui ne donne, à vide, que quelques centimètres d'étincelle, on prend comme condensateurs des carreaux de verre (30^{cm} ; 30^{cm} ; $0^{\text{cm}}, 15$) sur lesquels on colle du papier d'étain (20^{cm} ; 20^{cm} ; $0^{\text{cm}}, 001$). On pose ces condensateurs sur des supports isolants tels que des assiettes ou des cristallisoirs, et l'on établit les connexions au moyen de plaques métalliques soudées à des fils de cuivre (*fig.* p. 396).

La bobine de self-induction doit être grosse en proportion du condensateur.

Avec nos petits carreaux de verre étamé, cette bobine de self-induction peut être formée de quelques tours de fil de cuivre ($D = 10^{\text{cm}}$, $d = 0^{\text{cm}}, 2$). On les attache avec du cordonnet de soie le long de tiges de verre verticales fixées sur une planchette, en écartant les spires d'environ 1^{cm} .

Le déflagrateur est formé de deux tiges de laiton (20^{cm} ; $0^{\text{cm}}, 5$) portées par des colonnes de verre ($h = 25^{\text{cm}}$; $d = 0^{\text{cm}}, 8$). On maintient ces tiges horizontales, soit en les soudant à des tubes

métalliques qui glissent le long des colonnes de verre, soit en les passant dans des blocs de liège dans lesquels passent les supports

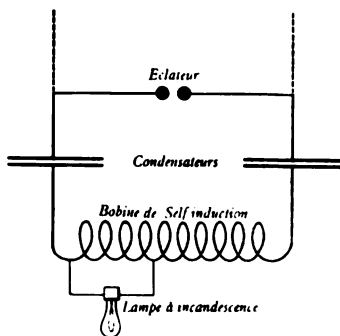


isolants. Ces dispositifs permettent de régler à volonté la longueur de l'étincelle.

205. Expériences sur les courants de haute fréquence.

— Actionner un *tube de Geissler* (VII, 60) directement avec la bobine d'induction et noter la différence d'aspect des deux électrodes.

Faire fonctionner l'appareil à haute fréquence et actionner le



tube de Geissler en le mettant en dérivation sur la bobine de self-induction du circuit de décharge. Les deux électrodes présentent le même aspect; la différence de potentiel aux extrémités du circuit est donc alternative (1).

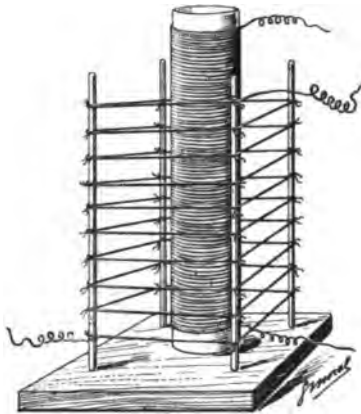
— Mettre une lampe à incandescence de quelques bougies en dérivation sur un certain nombre de spires de la bobine de self-induction. La lampe s'allume, bien que sa résistance soit plus de mille fois supérieure à celle du circuit inductif.

(1) Cette expérience ne prouve pas que la décharge soit *oscillante*. L'effet produit peut tenir seulement à ce que le courant de décharge part nécessairement de zéro pour y revenir. Il croît donc d'abord et décroît ensuite. Les forces électromotrices d'induction qui se produisent pendant ces deux périodes sont alors de signes contraires, et ce sont ces forces électromotrices que le tube de Geissler révèle.

Avec des appareils plus puissants, on peut allumer la lampe au moyen d'une seule spire. On peut encore l'allumer par induction au moyen d'un fil de cuivre faisant une seule fois le tour de la bobine de self-induction. Si l'appareil est assez fort, on peut faire passer ce courant induit dans le corps humain; la lampe s'allume encore *sans que le sujet éprouve aucune sensation*.

Rendement des appareils. — On notera, en passant, que la quantité de chaleur dégagée dans la lampe n'est pas insignifiante. On se rendra compte de ce que vaut cette quantité de chaleur en allumant la lampe avec un courant ordinaire et en cherchant à lui donner le même éclat. On mesurera d'autre part la puissance (EI) fournie à la bobine d'induction et l'on calculera le rendement total des appareils.

Transformateur pour très haute tension. — On peut augmenter à volonté la tension des courants de haute fréquence au moyen d'un transformateur. Le circuit primaire est constitué par la bobine de self-induction où se produit la décharge. Le secondaire

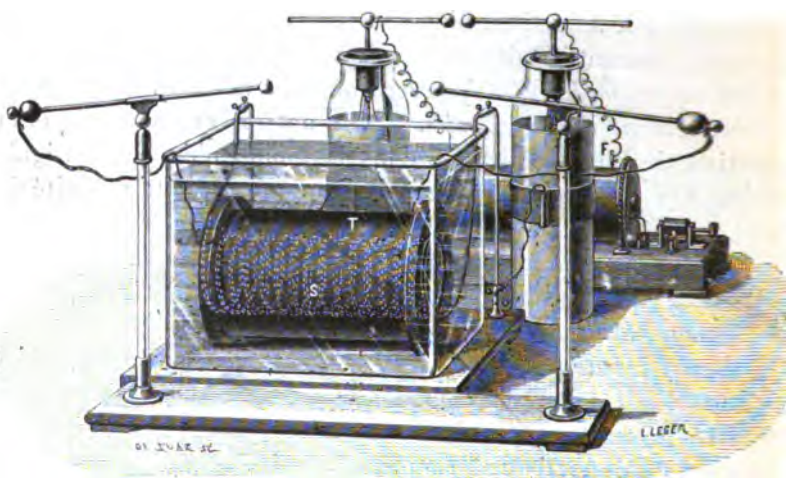


est un enroulement concentrique ayant un grand nombre de tours de fil.

Pour l'appareil de faible puissance que nous avons indiqué, on forme le circuit secondaire avec du fil fin ($d = 0^{\text{cm}}, 06$) qu'on enroule en spires contiguës sur un verre de lampe ($d = 5^{\text{cm}}$).

Pour les grandes puissances le transformateur est enroulé sur un tube d'ébonite et noyé dans l'huile comme le représente la figure suivante.

A chaque étincelle, de puissantes aigrettes s'échappent des extrémités du circuit induit. Ces aigrettes ozonisent fortement l'air



ambiant. En rapprochant les extrémités de ce fil induit, on obtient des étincelles beaucoup plus longues que l'étincelle de décharge du circuit inducteur.

— Actionner encore un tube de Geissler avec le circuit secondaire du transformateur à très haute tension. Le tube brille plus que lorsqu'on l'actionnait avec le circuit primaire et ses deux électrodes ont le même aspect.

Examiner le tube de Geissler par réflexion dans un miroir plan tenu à la main et auquel on imprime un mouvement de balancement. On constatera que la lumière du tube n'est pas continue et que ses illuminations successives sont synchrones des étincelles de décharge du condensateur.

— Le tube de Geissler s'allume encore si on ne le met en communication qu'avec un seul pôle du circuit induit.

Le tube s'illumine alors davantage si l'on approche la main ou un autre conducteur de façon à augmenter la capacité. Cette expérience peut être faite en remplaçant le tube de Geissler par une lampe à incandescence.

206. Principe de la télégraphie sans fil. — Cohéreur à limaille. — L'organe sensible est de la limaille de fer, ou mieux encore de nickel, dont les grains passent juste dans les trous d'un

tamis de 40 mailles au centimètre. On prend pour électrodes deux tiges métalliques ($d = 0^{\text{cm}}, 3$; $l = 9^{\text{cm}}$ et 5^{cm}) taillées en biseau à l'extrémité qui sera en contact avec la limaille. Les deux électrodes sont entrées dans un tube de verre ($d = 0^{\text{cm}}, 3$; $l = 10^{\text{cm}}$) après qu'on y a introduit un peu de limaille. L'intervalle entre les électrodes est de 1^{mm} ou 2^{mm} ; la limaille ne doit pas y être tassée. Les électrodes sont fixées au tube de verre avec un mastic fusible. On peut mettre autour du tube de verre un bout de tube de caoutchouc sur lequel se fait le serrage, quand on fixe l'appareil sur un support (41, 121, 146, 149).

Cohération et décohération. — Mettre le cohéreur dans le circuit d'une pile et d'une sonnerie. Si le cohéreur était extrêmement sensible, il pourrait laisser passer le courant malgré des chocs répétés; on mettrait alors en circuit une résistance de quelques centaines d'ohms.

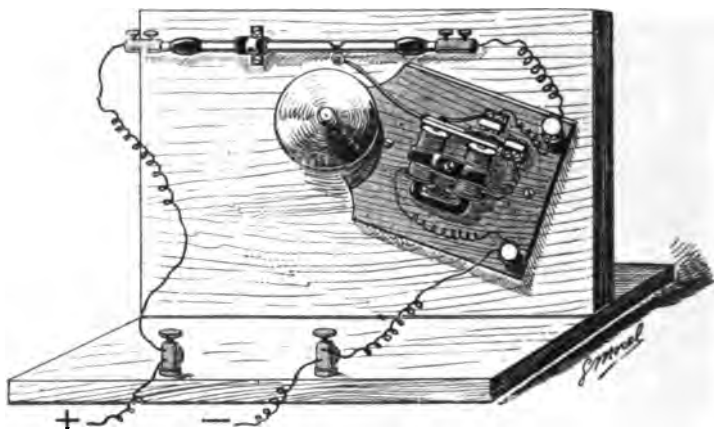
Poser le cohéreur sur un support isolant et décharger le plateau d'un électrophore sur l'électrode qui communique avec la sonnerie. La décharge passe à travers le cohéreur, qui est peu inductif, la limaille devient conductrice et la sonnerie fonctionne. On fait revenir le cohéreur à son état primitif au moyen de quelques chocs. On peut rendre la *décohération* automatique en produisant les chocs avec le marteau de la sonnerie elle-même dont on aura enlevé le timbre et que l'on aura fixée, avec le cohéreur, sur un même support vertical (146) (fig. p. 400).

Emploi du cohéreur comme relais dans la télégraphie ordinaire. — Installer une ligne télégraphique bien isolée dont le fil de retour peut être remplacé par des prises de terre (conduites d'eau ou de gaz). Mettre le cohéreur dans le circuit de la ligne, en laissant la pile et la sonnerie disposées en dérivation comme nous venons de le dire. Si l'on envoie dans la ligne la décharge d'un condensateur, ou même d'un plateau d'électrophore, la cohération se produit encore et la sonnerie fonctionne.

Télégraphie sans fil. — Faisons éclater une forte étincelle



électrique dans le voisinage immédiat du cohéreur; la cohération se produit et la sonnerie fonctionne. Si l'étincelle éclate de plus en plus loin, ou si l'énergie de cette étincelle est de plus en plus faible, il arrive un moment où la cohération ne se produit plus.



Remplaçons alors la sonnerie par un appareil plus sensible, tel qu'un voltmètre de 0 à 3 volts ayant une centaine d'ohms de résistance. Nous reconnaitrons alors que la décharge avait bien encore diminué la résistance du cohéreur, mais d'une quantité trop faible pour que le courant ait pu actionner la sonnerie.

Avec cet appareil d'observation plus délicat, on pourra déceler des ondes électriques un peu fortes à une distance de plusieurs mètres.

La sensibilité est beaucoup augmentée si l'on met un point du cohéreur au sol et si l'on met aussi au sol l'un des deux conducteurs entre lesquels éclate l'étincelle excitatrice.

On augmente encore cette sensibilité, et par conséquent aussi la distance à laquelle les signaux sont perceptibles en attachant aux pôles isolés de l'excitateur et du cohéreur des fils de cuivre verticaux (*antennes*) de même longueur, portés sur des supports isolants. Avec des antennes de quelques mètres de hauteur *et de bonnes prises de terre*, la distance de transmission des signaux fournis par une machine électrostatique se mesure en hectomètres. Avec des antennes de plus de 50^m de hauteur chargées à des potentiels extrêmement élevés, la distance de transmission a pu se compter en milliers de kilomètres (146).

APPENDICE.

TABLEAUX NUMÉRIQUES.

**Inverses, carrés, racines carrées, cubes, racines cubiques,
circonférences et surfaces de cercles.**

x .	$\frac{1}{x}$.	x^2 .	\sqrt{x} .	x^3 .	$\sqrt[3]{x}$.	πx .	$\frac{\pi x^2}{4}$.
1	1,0000	1	1,000	1	1,000	3,14	0,79
2	0,5000	4	1,414	8	1,259	6,28	3,14
3	0,3333	9	1,732	27	1,442	9,42	7,07
4	0,2500	16	2,000	64	1,587	12,57	12,57
5	0,2000	25	2,236	125	1,709	15,71	19,63
6	0,1667	36	2,449	216	1,817	18,85	28,27
7	0,1429	49	2,645	343	1,912	21,99	38,48
8	0,1250	64	2,828	512	2,000	25,13	50,27
9	0,1111	81	3,000	729	2,080	28,27	63,62
10	0,1000	100	3,162	1 000	2,154	31,42	78,54
11	0,0909	121	3,316	1 331	2,223	34,56	95,03
12	0,0833	144	3,464	1 728	2,289	37,70	113,10
13	0,0769	169	3,605	2 197	2,351	40,84	132,73
14	0,0714	196	3,741	2 744	2,410	43,98	153,94
15	0,0667	225	3,872	3 375	2,466	47,12	176,71
16	0,0625	256	4,000	4 096	2,519	50,27	201,06
17	0,0588	289	4,123	4 913	2,571	53,41	226,98
18	0,0556	324	4,242	5 832	2,620	56,55	254,37
19	0,0526	361	4,358	6 859	2,668	59,69	283,53
20	0,0500	400	4,472	8 000	2,714	62,83	314,16
21	0,0476	441	4,582	9 261	2,758	65,97	346,36
22	0,0455	484	4,690	10 648	2,802	69,11	380,13
23	0,0435	529	4,795	12 167	2,843	72,26	415,48
24	0,0417	576	4,898	13 824	2,884	75,40	452,39
25	0,0400	625	5,000	15 625	2,924	78,54	490,87
26	0,0385	676	5,099	17 576	2,962	81,68	530,93
27	0,0370	729	5,196	19 683	3,000	84,82	572,56
28	0,0357	784	5,291	21 952	3,036	87,96	615,75
29	0,0345	841	5,385	24 389	3,072	91,11	660,52
30	0,0333	900	5,477	27 000	3,107	94,25	706,86
31	0,0323	961	5,567	29 791	3,141	97,39	754,77
32	0,0313	1 024	5,656	32 768	3,174	100,53	804,25
33	0,0303	1 089	5,744	35 937	3,207	103,67	855,30
34	0,0294	1 156	5,830	39 304	3,239	106,81	907,92
35	0,0286	1 225	5,916	42 875	3,271	109,96	962,11
36	0,0278	1 296	6,000	46 656	3,301	113,10	1 017,88
37	0,0270	1 369	6,082	50 653	3,332	116,24	1 075,21
38	0,0263	1 444	6,164	54 872	3,361	119,38	1 134,11
39	0,0256	1 521	6,244	59 319	3,391	122,52	1 194,59
40	0,0250	1 600	6,324	64 000	3,419	125,66	1 256,64
41	0,0244	1 681	6,403	68 921	3,448	128,80	1 320,25
42	0,0238	1 764	6,480	74 088	3,476	131,95	1 385,44
43	0,0233	1 849	6,557	79 507	3,503	135,09	1 452,20
44	0,0227	1 936	6,633	85 184	3,530	138,23	1 520,53
45	0,0222	2 025	6,708	91 125	3,556	141,37	1 590,43
46	0,0217	2 116	6,782	97 336	3,583	144,51	1 661,90
47	0,0213	2 209	6,855	103 823	3,608	147,65	1 734,94
48	0,0208	2 304	6,928	110 592	3,634	150,80	1 809,56
49	0,0204	2 401	7,000	117 649	3,659	153,94	1 885,74
50	0,0200	2 500	7,071	125 000	3,684	157,08	1 963,49

Inverses, carrés, racines carrées, cubes, racines cubiques, circonférences et surfaces de cercles (suite).

x .	$\frac{1}{x}$.	x^2 .	\sqrt{x} .	x^3 .	$\sqrt[3]{x}$.	πx .	$\frac{\pi x^2}{4}$.
51	0,0196	2 601	7,141	132 651	3,708	160,22	2 042,82
52	0,0192	2 704	7,211	140 608	3,732	163,36	2 123,72
53	0,0189	2 809	7,280	148 877	3,756	166,50	2 206,18
54	0,0185	2 916	7,348	157 464	3,779	169,65	2 290,21
55	0,0182	3 025	7,416	166 375	3,802	172,79	2 375,88
56	0,0179	3 136	7,483	175 616	3,825	175,93	2 463,01
57	0,0175	3 249	7,549	185 193	3,848	179,07	2 551,76
58	0,0172	3 364	7,615	195 112	3,870	182,21	2 642,08
59	0,0169	3 481	7,681	205 379	3,892	185,35	2 733,97
60	0,0167	3 600	7,745	216 000	3,914	188,50	2 827,43
61	0,0164	3 721	7,810	226 981	3,936	191,64	2 922,47
62	0,0161	3 844	7,874	238 328	3,957	194,78	3 019,07
63	0,0159	3 969	7,937	250 047	3,979	197,92	3 117,24
64	0,0156	4 096	8,000	262 144	4,000	201,06	3 216,99
65	0,0154	4 225	8,062	274 625	4,020	204,20	3 318,31
66	0,0152	4 356	8,124	287 496	4,041	207,34	3 421,19
67	0,0149	4 489	8,185	300 763	4,061	210,49	3 525,65
68	0,0147	4 624	8,246	314 432	4,081	213,63	3 631,68
69	0,0145	4 761	8,306	328 509	4,101	216,77	3 739,28
70	0,0143	4 900	8,366	343 000	4,121	219,91	3 848,45
71	0,0141	5 041	8,426	357 911	4,140	223,05	3 959,19
72	0,0139	5 184	8,485	373 248	4,160	226,19	4 071,50
73	0,0137	5 329	8,544	389 017	4,179	229,34	4 185,39
74	0,0135	5 476	8,602	405 224	4,198	232,48	4 300,84
75	0,0133	5 625	8,660	421 875	4,217	235,62	4 417,86
76	0,0132	5 776	8,717	438 976	4,235	238,76	4 536,46
77	0,0130	5 929	8,774	456 533	4,254	241,90	4 656,62
78	0,0128	6 084	8,831	474 522	4,272	245,04	4 778,36
79	0,0127	6 241	8,888	493 039	4,290	248,19	4 901,67
80	0,0125	6 400	8,944	512 000	4,308	251,33	5 026,55
81	0,0123	6 561	9,000	531 441	4,326	254,47	5 153,00
82	0,0122	6 724	9,055	551 368	4,344	257,61	5 281,02
83	0,0120	6 889	9,110	571 787	4,362	260,75	5 410,56
84	0,0119	7 056	9,165	592 704	4,379	263,89	5 541,77
85	0,0118	7 225	9,219	614 125	4,396	267,03	5 674,50
86	0,0116	7 396	9,273	636 056	4,414	270,18	5 808,80
87	0,0115	7 569	9,327	658 503	4,431	273,32	5 944,68
88	0,0114	7 744	9,380	681 472	4,447	276,46	6 082,12
89	0,0112	7 921	9,433	704 969	4,464	279,60	6 221,14
90	0,0111	8 100	9,486	729 000	4,481	282,74	6 361,72
91	0,0110	8 281	9,539	753 571	4,497	285,88	6 503,88
92	0,0109	8 464	9,591	778 688	4,514	289,03	6 647,61
93	0,0108	8 649	9,643	804 357	4,530	292,17	6 792,91
94	0,0106	8 836	9,695	830 584	4,546	295,31	6 939,78
95	0,0105	9 025	9,746	857 375	4,562	298,45	7 088,22
96	0,0104	9 216	9,797	884 736	4,578	301,59	7 238,23
97	0,0103	9 409	9,848	912 673	4,594	304,73	7 389,81
98	0,0102	9 604	9,899	941 192	4,610	307,88	7 542,96
99	0,0101	9 801	9,949	970 299	4,626	311,02	7 697,69
100	0,0100	10 000	10,000	1 000 000	4,642	314,16	7 853,98

Logarithmes décimaux et népériens

$$e = 2,71828, \quad \frac{1}{e} = 0,36788.$$

NOMBRES.	LOGARITHMES		NOMBRES.	LOGARITHMES	
	décimaux.	népériens.		décimaux.	népériens.
1	0,0000	0,0000	51	1,7076	3,9318
2	0,3010	0,6931	52	1,7160	3,9512
3	0,4771	1,0986	53	1,7243	3,9703
4	0,6021	1,3863	54	1,7324	3,9890
5	0,6990	1,6094	55	1,7404	4,0073
6	0,7782	1,7918	56	1,7482	4,0254
7	0,8451	1,9459	57	1,7559	4,0431
8	0,9031	2,0794	58	1,7634	4,0604
9	0,9542	2,1972	59	1,7709	4,0775
10	1,0000	2,3026	60	1,7782	4,0943
11	1,0411	2,3979	61	1,7853	4,1109
12	1,0792	2,4849	62	1,7924	4,1271
13	1,1139	2,5649	63	1,7993	4,1431
14	1,1461	2,6391	64	1,8062	4,1589
15	1,1761	2,7081	65	1,8129	4,1744
16	1,2041	2,7726	66	1,8195	4,1897
17	1,2304	2,8332	67	1,8261	4,2047
18	1,2553	2,8904	68	1,8325	4,2195
19	1,2788	2,9444	69	1,8388	4,2341
20	1,3010	2,9977	70	1,8451	4,2485
21	1,3222	3,0445	71	1,8513	4,2627
22	1,3424	3,0910	72	1,8573	4,2767
23	1,3617	3,1355	73	1,8633	4,2905
24	1,3802	3,1781	74	1,8692	4,3041
25	1,3979	3,2189	75	1,8751	4,3175
26	1,4150	3,2581	76	1,8808	4,3307
27	1,4314	3,2958	77	1,8865	4,3438
28	1,4472	3,3322	78	1,8921	4,3567
29	1,4624	3,3673	79	1,8976	4,3694
30	1,4771	3,4012	80	1,9031	4,3820
31	1,4914	3,4340	81	1,9085	4,3944
32	1,5051	3,4657	82	1,9138	4,4067
33	1,5185	3,4965	83	1,9191	4,4188
34	1,5315	3,5264	84	1,9243	4,4308
35	1,5441	3,5553	85	1,9294	4,4427
36	1,5563	3,5835	86	1,9345	4,4543
37	1,5682	3,6109	87	1,9395	4,4659
38	1,5798	3,6376	88	1,9445	4,4773
39	1,5911	3,6636	89	1,9494	4,4886
40	1,6021	3,6889	90	1,9542	4,4998
41	1,6128	3,7136	91	1,9590	4,5109
42	1,6232	3,7377	92	1,9638	4,5218
43	1,6335	3,7612	93	1,9685	4,5326
44	1,6435	3,7842	94	1,9731	4,5433
45	1,6532	3,8067	95	1,9777	4,5539
46	1,6628	3,8286	96	1,9823	4,5643
47	1,6721	3,8501	97	1,9868	4,5747
48	1,6812	3,8712	98	1,9912	4,5850
49	1,6902	3,8918	99	1,9956	4,5951
50	1,6990	3,9120	100	2,0000	4,6052

**Valeurs naturelles des fonctions circulaires
de degré en degré.**

	SINUS.	COSINUS.	TANG.	COTANG.	
0	0,0000	1,0000	0,0000	∞	90
1	0,0175	0,9998	0,0175	57,290	89
2	0,0349	0,9994	0,0349	28,636	88
3	0,0523	0,9986	0,0524	19,081	87
4	0,0698	0,9976	0,0699	14,301	86
5	0,0872	0,9962	0,0875	11,430	85
6	0,1045	0,9945	0,1051	9,5144	84
7	0,1219	0,9925	0,1228	8,1443	83
8	0,1392	0,9903	0,1405	7,1154	82
9	0,1564	0,9877	0,1584	6,3138	81
10	0,1736	0,9848	0,1763	5,6713	80
11	0,1908	0,9816	0,1944	5,1446	79
12	0,2079	0,9781	0,2126	4,7046	78
13	0,2250	0,9744	0,2309	4,3315	77
14	0,2419	0,9703	0,2493	4,0108	76
15	0,2588	0,9659	0,2679	3,7321	75
16	0,2756	0,9613	0,2867	3,4874	74
17	0,2924	0,9563	0,3057	3,2709	73
18	0,3090	0,9511	0,3249	3,0777	72
19	0,3256	0,9455	0,3443	2,9012	71
20	0,3420	0,9397	0,3640	2,7475	70
21	0,3584	0,9336	0,3839	2,6051	69
22	0,3746	0,9272	0,4040	2,4751	68
23	0,3907	0,9205	0,4245	2,3559	67
24	0,4067	0,9135	0,4452	2,2460	66
25	0,4226	0,9063	0,4663	2,1445	65
26	0,4384	0,8988	0,4877	2,0503	64
27	0,4540	0,8910	0,5095	1,9626	63
28	0,4695	0,8829	0,5317	1,8807	62
29	0,4848	0,8746	0,5543	1,8040	61
30	0,5000	0,8660	0,5774	1,7321	60
31	0,5150	0,8572	0,6009	1,6643	59
32	0,5299	0,8480	0,6249	1,6003	58
33	0,5446	0,8387	0,6494	1,5399	57
34	0,5592	0,8290	0,6745	1,4826	56
35	0,5736	0,8192	0,7002	1,4281	55
36	0,5878	0,8090	0,7265	1,3764	54
37	0,6018	0,7986	0,7536	1,3270	53
38	0,6157	0,7880	0,7813	1,2799	52
39	0,6293	0,7771	0,8098	1,2349	51
40	0,6428	0,7660	0,8391	1,1918	50
41	0,6561	0,7547	0,8693	1,1504	49
42	0,6691	0,7431	0,9004	1,1106	48
43	0,6820	0,7314	0,9325	1,0724	47
44	0,6947	0,7193	0,9657	1,0355	46
45	0,7071	0,7071	1,0000	1,0000	45
	COSINUS.	SINUS.	COTANG.	TANG.	

Valeurs naturelles des fonctions circulaires de grade en grade.

	SINUS.	COSINUS.	TANG.	COTANG.	
0	0,0000	1,0000	0,0000	x	100
1	0,0157	0,9999	0,0157	63,6567	99
2	0,0314	0,9995	0,0314	31,8205	98
3	0,0471	0,9989	0,0472	21,2049	97
4	0,0628	0,9980	0,0629	15,8945	96
5	0,0785	0,9969	0,0787	12,7062	95
6	0,0941	0,9956	0,0945	10,5789	94
7	0,1097	0,9940	0,1104	9,0379	93
8	0,1253	0,9921	0,1263	7,9158	92
9	0,1409	0,9899	0,1423	7,0264	91
10	0,1564	0,9877	0,1584	6,3138	90
11	0,1719	0,9851	0,1745	5,7297	89
12	0,1874	0,9813	0,1908	5,2422	88
13	0,2028	0,9772	0,2071	4,8288	87
14	0,2181	0,9729	0,2235	4,4737	86
15	0,2334	0,9674	0,2401	4,1653	85
16	0,2487	0,9616	0,2568	3,8947	84
17	0,2639	0,9546	0,2736	3,6554	83
18	0,2790	0,9463	0,2905	3,4420	82
19	0,2940	0,9358	0,3076	3,2506	81
20	0,3090	0,9241	0,3249	3,0777	80
21	0,3239	0,9111	0,3424	2,9208	79
22	0,3387	0,8969	0,3600	2,7776	78
23	0,3535	0,8814	0,3779	2,6464	77
24	0,3681	0,8648	0,3959	2,5257	76
25	0,3827	0,8473	0,4142	2,4142	75
26	0,3971	0,8288	0,4327	2,3109	74
27	0,4115	0,8094	0,4515	2,2148	73
28	0,4258	0,7891	0,4706	2,1251	72
29	0,4399	0,7679	0,4899	2,0413	71
30	0,4540	0,7459	0,5095	1,9626	70
31	0,4679	0,7231	0,5295	1,8887	69
32	0,4818	0,6995	0,5498	1,8190	68
33	0,4955	0,6752	0,5704	1,7532	67
34	0,5090	0,6502	0,5914	1,6909	66
35	0,5225	0,6246	0,6128	1,6319	65
36	0,5358	0,5984	0,6346	1,5757	64
37	0,5490	0,5717	0,6569	1,5224	63
38	0,5621	0,5445	0,6796	1,4715	62
39	0,5750	0,5169	0,7028	1,4229	61
40	0,5878	0,4889	0,7265	1,3764	60
41	0,6004	0,4605	0,7507	1,3319	59
42	0,6129	0,4318	0,7757	1,2892	58
43	0,6252	0,4028	0,8012	1,2482	57
44	0,6374	0,3734	0,8273	1,2088	56
45	0,6494	0,3437	0,8541	1,1708	55
46	0,6613	0,3137	0,8816	1,1343	54
47	0,6730	0,2834	0,9099	1,0990	53
48	0,6845	0,2528	0,9391	1,0649	52
49	0,6959	0,2219	0,9691	1,0319	51
50	0,7071	0,1917	1,0000	1,0000	50
	COSINUS.	SINUS.	COTANG.	TANG.	

Conversion des degrés et des grades en radians.

1 degré	= 0,017 45 ^{radian}
1 minute	= 0,000 291
1 seconde	= 0,000 005 3
1 grade	= 0,015 708
1 radian	= 57° 18'
1 radian	= 63 ^{grades} ,66

Valeurs de $1 - \cos x$.

x EN DEGRES.	$1 - \cos x$.	x EN RADIANS.
1	0,0002	0,017
5	0,0038	0,087
10	0,015	0,17
15	0,034	0,26
20	0,060	0,35
25	0,094	0,44

Vitesse du son dans l'air sec (0° et 76^{mm}).

$$V = 33\,136 \text{ (C.G.S.)}$$

Influence de la température sur la vitesse du son dans l'air.

TEMPÉRATURE.....	-20° .	-10° .	0° .	$+10^{\circ}$.	$+20^{\circ}$.
Vitesse du son (en C.G.S.)....	$V - 1237$	$V - 612$	V	$V + 601$	$V + 1192$

Influence de l'humidité.

$$\text{Tension de vapeur} = 1^{\text{cm}}, \quad \text{Vitesse} = V + 80 \text{ (C.G.S.)}$$

Vitesse du son à l'intérieur d'un tuyau (en C.G.S.).

Influence du diamètre et de la période.

DIAMÈTRE du tuyau.	LONGUEURS D'ONDE DU SON.		
	18^{cm} .	9^{cm} .	6^{cm} .
$5,5^{\text{cm}}$	V	V	V
$2,6$	$V - 7$ (?)	$V - 14$ (?)	$V - 35$ (?)
$1,3$	$V - 330$	$V - 290$	$V - 290$
$0,65$	$V - 980$	$V - 570$	$V - 550$
$0,3$	$V - 2740$	$V - 1390$	»

Vitesse du son dans l'eau.Environ $143\,500$ (C.G.S.).**Vitesse du son dans le fer.**Environ $500\,000$ (C.G.S.).**Limites de la hauteur des sons perceptibles par l'oreille.**De 16 périodes par seconde à $40\,000$ périodes par seconde environ.

Hauteur absolue des sons.

NOTES.	NOMBRE DE PÉRIODES par seconde.
la ₃ normal	435
ut ₃ normal	264
ut ₃ des cabinets de physique..	2 ⁸ = 256

Notes sur lesquelles sont accordés les instruments à corde.

Violon.....	sol ₂ ré ₃ la ₃ mi ₄
Alto.....	ut ₂ sol ₂ ré ₃ la ₃
Violoncelle	ut ₁ sol ₁ ré ₂ la ₂
Piano	de la ₋₁ (= 27 périodes) à la ₆ (= 3480 périodes)

Limites des sons émis par la voix humaine.

Soprano.....	de la ₂ à ut ₃
Contralto	de mi ₂ à fa ₃
Ténor.....	de ré ₂ à ut ₄
Baryton	de si ₁ à sol ₃
Basse	de mi ₁ à ré ₃

Succession des sons harmoniques de ut₃.

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
ut ₃	ut ₄	sol ₄	ut ₅	mi ₅	sol ₅	si ₅	ut ₆	ré ₆	mi ₆

Intervalles musicaux.

GAMME TEMPÉRÉE par puissances de $2^{\frac{1}{12}}$.	GAMME DE PYTHAGORE (par quintes = $\frac{3}{2}$)		GAMME DIATONIQUE (par rapports simples).		INTERVALLES avec la tonique.
		Intervalles successifs.		Intervalles successifs.	
ut, ... 1	1		ut 1		unisson
ré♭ ... $2^{\frac{1}{12}}$	$\frac{256}{243} = \frac{2^8}{3^5}$			$\frac{9}{8}$	ton majeur
ut♯ ... $2^{\frac{2}{12}}$	$\frac{9}{8} \cdot \frac{243}{256}$	$\frac{9}{8}$			
ré ... $2^{\frac{3}{12}}$	$\frac{9}{8} = \frac{3^2}{2^3}$		ré $\frac{9}{8}$		seconde
mi♭ ... $2^{\frac{4}{12}}$	$\frac{9}{8} \cdot \frac{256}{243}$	$\frac{9}{8}$		$\frac{10}{9}$	ton mineur
ré♯ ... $2^{\frac{5}{12}}$	$\frac{81}{64} \cdot \frac{243}{256}$	$\frac{9}{8}$			
mi ... $2^{\frac{6}{12}}$	$\frac{81}{64} = \frac{3^4}{2^6}$		mi $\frac{5}{4}$	$\frac{16}{15}$	tierce majeure
fa ... $2^{\frac{7}{12}}$	$\frac{4}{3} = \frac{2^2}{3}$	$\frac{256}{243}$	fa $\frac{4}{3}$		quarte
sol♭ ... $2^{\frac{8}{12}}$	$\frac{4}{3} \cdot \frac{256}{243}$	$\frac{9}{8}$		$\frac{9}{8}$	ton majeur
fa♯ ... $2^{\frac{9}{12}}$	$\frac{3}{2} \cdot \frac{243}{256}$	$\frac{9}{8}$			
sol ... $2^{\frac{10}{12}}$	$\frac{3}{2}$		sol $\frac{3}{2}$		quinte
la♭ ... $2^{\frac{11}{12}}$	$\frac{3}{2} \cdot \frac{256}{243}$	$\frac{9}{8}$		$\frac{10}{9}$	ton mineur
sol♯ ... $2^{\frac{12}{12}}$	$\frac{27}{16} \cdot \frac{243}{256}$	$\frac{9}{8}$			
la ... $2^{\frac{13}{12}}$	$\frac{27}{16} = \frac{3^3}{2^4}$		la $\frac{5}{3}$		sixte majeure
si♭ ... $2^{\frac{14}{12}}$	$\frac{27}{16} \cdot \frac{256}{243}$	$\frac{9}{8}$		$\frac{9}{8}$	ton majeur
la♯ ... $2^{\frac{15}{12}}$	$\frac{243}{128} \cdot \frac{243}{256}$	$\frac{9}{8}$			
si ... $2^{\frac{16}{12}}$	$\frac{243}{128} = \frac{3^5}{2^7}$		si $\frac{15}{8}$	$\frac{16}{15}$	septime majeure
ut ... $2^{\frac{17}{12}}$	2	$\frac{256}{243}$	ut 2		octave

tierce mineure = $\frac{6}{5}$
 sixte mineure = $\frac{8}{5}$

Vitesse de la lumière dans l'air,

$3 \cdot 10^{10}$ (à $\frac{1}{1000}$ près) C.G.S.

Vitesse des ondes électromagnétiques dans l'air,

$3 \cdot 10^{10}$ (à $\frac{1}{100}$ près) C.G.S.

Rapport des unités C.G.S. électrostatiques et électromagnétiques dans l'air,

$3 \cdot 10^{10}$ (à $\frac{1}{1000}$ près).

Aberration de la lumière

$20^{\circ}, 47.$

Temps mis par la lumière :

Pour parcourir le rayon moyen de l'orbite terrestre.....	500 secondes
Pour venir de <i>a Centaure</i>	4 ans, 6 mois
Pour venir de <i>Sirius</i>	9 ans
Pour venir de <i>a Petite Ourse (Polaire)</i>	45 ans

Parallaxe solaire,

$8^{\circ}, 80.$

Quantités de chaleur que la Terre reçoit du Soleil.

Un centimètre carré exposé à la radiation *au-dessus* de l'atmosphère terrestre recevrait *environ* 0,2 watt, *soit* 3 petites calories par minute.

Quantité totale de chaleur rayonnée par le Soleil.

En 6 heures, le Soleil rayonne autant de chaleur qu'il en faudrait pour vaporiser une masse d'eau égale environ à la masse de la Terre.

Émission totale d'un corps noir

à la température absolue θ ,
dans un milieu où la température absolue est T,
en watts par centimètre carré

$$\int_0^{\infty} E d\lambda = 5,32 \cdot 10^{-12} (\theta^4 - T^4).$$

Répartition de l'énergie dans le spectre d'un corps noir.

$$E = \theta^5 \varphi(\lambda\theta).$$

Valeurs de E pour $\theta = 16,46^\circ$ centigrades.

λ en microns.	E.	λ en microns.	E.
1	108	3	165
1,5	252	3,5	115
1,78 maximum	271 maximum	4	88
2	262	4,5	66
2,5	216	5	48

Étalons photométriques.

Dans la pratique on se sert presque toujours de lampes à incandescence,
qui ont été comparées à la lampe Carcel.

Étalon Violle (1).....	violle 1,000
Lampe Carcel (2).....	0,481
Bougie décimale (définition).....	0,050
Bougies ordinaires.....	0,06 environ
Lampe Hefner-Alteneck	0,053

(1) 1cm³ de platine fondu à la température de solidification, émission normale.

(2) Consommation horaire : 42^g d'huile de colza épurée.

Diamètre extérieur du bec.....	2 ^{cm} , 35
Diamètre intérieur du bec.....	1 ^{cm} , 7
Diamètre du courant d'air extérieur.....	4 ^{cm} , 55
Hauteur du verre.....	20 ^{cm}
Distance du coude à la base.....	6 ^{cm} , 1
Diamètre extérieur du verre au coude.....	4 ^{cm} , 7
" " " en haut.....	3 ^{cm} , 4
Épaisseur moyenne du verre.....	0 ^{cm} , 2
Mèche : nombre de brins.....	75
Poids au centimètre.....	0 ^g , 36
Hauteur utilisée.....	1 ^{cm}
Hauteur du coude au-dessus de la mèche..	0 ^{cm} , 7
Hauteur de flamme.....	3 ^{cm} , 5
Surface.....	5cm ² , 25

Prix de revient de quelques modes d'éclairage.

MODE D'ÉCLAIRAGE.	QUANTITÉ nécessaire pour produire 1 carcel-heure.	CHALEUR dégagée en grandes calories par carcel-heure.	NOMBRE de litres de CO ² produit pour 1 carcel-heure.
Bougies.....	80 ^g	800	90
Gaz (bec papillon).....	125 ^l	650	80
Gaz (bec à couronne).....	90 ^l	470	58
Lampe à huile.....	Carcel = 42 ^g	400	56
Lampe à pétrole.....	35 ^g	350	44
Acétylène.....	7 ^l	100	14
Gaz (manchon à incand.)....	15 ^l	80	7
Alcool (manchon à incand.)....	10 ^g	70	10
Lampe à incandescence.....	30 wattheures	25	0
Lampe à incandescence très poussée.....	20 wattheures	17	0
Lampe à arc.....	10 »	9	0
Arc au mercure.....	3 » (?)	2,5	0
Rayonnement du Soleil.....	1,5 wattheure (?)	1,3	0

Éclats moyens de quelques sources lumineuses.

SOURCE.	ECLAT en bougies décimales par centimètre carré.
Étalon Violet.....	20 (définition)
Soleil.....	200 000
Cratère de l'arc.....	20 000
Lumière oxydrique.....	500
Lampe à incandescence poussée.....	100
Ciel plus ou moins près du Soleil.....	1 à 40
Lampe Carcel.....	2
Papier blanc en plein jour.....	2 environ
Bougie.....	0,4
Lune.....	0,3
Peinture noire-mat en plein Soleil.....	0,03 environ
Papier blanc sur lequel on peut lire aisément....	0,001 environ

**Longueur du centimètre en fonction de la longueur d'onde
de la lumière rouge du cadmium.**

Dans l'air à 14°,93 et sous la pression de 76^{cm} de mercure.

$$1^{\text{cm}} = 15\,531,63 \lambda,$$

$$\lambda = 0^{\text{cm}},000064\,384\,72.$$

**Longueurs d'onde limites des couleurs du spectre
en millièmes de millimètre.**

Ondes hertziennes ...	} 3.10 ¹² (cour. alterno.) 600 000 000 (Hertz) 20 000 000 (Righi) 5 000 000 (Bose)	Jaune.....	580 ^{µµ}
		Vert.....	540
		Bleu.....	490
		Indigo.....	460
		Violet.....	420
		Violet lavande...	400
		Ultra-violet.....	360
Infra-rouge ...	} 25 500 ^{µµ} (Rubens) 2 700 (Langley)	Ultra-violet ex-	215 (Sr dans l'arc)
Rouge extrême	} 810	trême.....	150 (absorbé par l'air).
Rouge.....	} 720		
Orange.....	} 650		
	} 580	Rayons N.....	} 17 8

**Longueurs d'onde des principales raies visibles
en millièmes de millimètre, rapportées à $\lambda_D = 589,60$.**

RAIE du spectre solaire.	CORPS auquel est due la raie.	LONGUEUR d'onde.	RAIE du spectre solaire.	CORPS auquel est due la raie.	LONGUEUR d'onde.	
	potassium.....	769,77 ^µ				
A.....	potassium.....	766,44	} b ₁	magnésium.....	518,37 ^{µµ}	
B.....	oxygène.....	759,39		b ₂	magnésium.....	517,27
	oxygène.....	687,00		b ₃	fer.....	516,90
	lithium.....	670,79		b ₄	magnésium et fer	516,74
C.....	hydrogène.....	656,29	c.....	fer.....	495,76	
	cadmium.....	643,85		baryum.....	493,41	
a.....	oxygène.....	627,81	F.....	hydrogène.....	486,14	
	lithium.....	610,37		cadmium.....	480,06	
D ₁	sodium.....	589,60	d.....	fer.....	466,82	
	nickel.....	589,29		lithium.....	460,21	
D ₂	sodium.....	589,00		baryum.....	455,41	
D ₃	hélium.....	587,58		fer.....	438,36	
	thallium.....	535,05	G.....	fer et calcium..	430,79	
E ₁	fer et calcium..	527,04	g.....	calcium.....	422,68	
E ₂	fer.....	526,96		potassium.....	404,42	
			H.....	calcium.....	396,85	
			K.....	calcium.....	393,37	

**Intensité des faisceaux réfléchis et réfractés
sous différentes incidences.**

pour un verre d'indice $n = 1,52$.

ANGLE		INTENSITÉ de la lumière	
dans l'air.	dans le verre en degrés et minutes.	réfléchi.	réfracté.
0°	0°	0,043	0,957
20	13. 1	0,043	0,957
40	25. 2	0,049	0,951
60	34.46	0,093	0,907
75	39.30	0,258	0,742
80	40.24	0,392	0,608
85	40.56	0,616	0,384
90	41. 9	1,000	0,000

Indices de réfraction de quelques échantillons de verres.

LONGUEUR D'ONDE en millièmes de millimètre.	CROWN D = 2,49. Variation d'indice pour 1° + 0,000 001 environ.	FLINT LÉGER D = 3,86. Variation d'indice pour 1° + 0,000 004 environ.	FLINT LOURD D = 4,42. Variation d'indice pour 1° + 0,000 006 environ.
	^{mm} 671 (Li)	1,514	1,537
589 (Na)	1,517	1,541	1,710
535 (Ti)	1,520	1,545	1,719
397 (raie H)	1,533	1,563	1,758

Indices de réfraction de quelques corps cristallisés.

LONGUEURS D'ONDE en millièmes de millimètre.	FLUORINE (Ca F ₂).	SEL GEMME (Na Cl).	SYLVINE (K Cl).	DIAMANT Indice à 20°.
	Variation d'indice pour 1° - 0,000 01 environ.	Variation d'indice pour 1° - 0,000 04 environ.	Variation d'indice pour 1° - 0,000 03 environ.	
	Indice à 20°.	Indice à 20°.	Indice à 20°.	
^{mm} 9000	1,320	1,501	1,467	»
671 (Li)	1,4325	1,5397	1,4865	2,408
589 (Na)	1,4338	1,5441	1,4903	2,417
535 (Ti)	1,4353	1,5483	1,4940	2,425
397 (raie H)	1,4421	1,5683	1,5106	2,465

Indices de réfraction de quelques corps cristallisés (suite).

LONGUEURS d'onde en millièmes de millimètre.	CALCITE.		QUARTZ.		GYPSÉ. Indices principaux		
	Rayon ordinaire.	Rayon extraordinaire.	Rayon ordinaire.	Rayon extraordinaire.			
	Variation d'indice pour 1" + 0,000 001 environ.	Variation d'indice pour 1" + 0,000 003 environ.	Variation d'indice pour 1" - 0,000 005 environ.	Variation d'indice pour 1" - 0,000 007 environ.			
	Indice à 90°.	Indice à 20°.	Indice à 20°.	Indice à 20°.			
$\mu\mu$ 671 (Li)....	1,6537	1,4843	1,5414	1,5505	1,5267	1,5198	1,5137
589 (Na)...	1,6584	1,4864	1,5442	1,5533	1,5296	1,5226	1,5157
535 (Tl)....	1,6627	1,4884	1,5466	1,5557	1,5322	1,5251	1,5182
397 (raie H).	1,6832	1,4978	1,5581	1,5677			

Indices de réfraction de l'air.

LONGUEURS D'ONDE en millièmes de millimètre.	VALEURS de l'indice.	LONGUEURS D'ONDE en millièmes de millimètre.	VALEURS de l'indice.
$\mu\mu$ 690	1,000 291	$\mu\mu$ 390	1,000 298
589	1,000 292	290	1,000 307
490	1,000 294		

Indices de réfraction de quelques gaz pour la lumière du sodium
(0° et 76°m).

GAZ.	INDICE.	GAZ.	INDICE.
Hélium.....	1,000 043	Gaz ammoniac.....	1,000 375
Hydrogène.....	1,000 139	Anhydride carbonique...	1,000 450
Oxygène.....	1,000 271	Anhydride sulfureux....	1,000 700
Argon.....	1,000 282	Chlore.....	1,000 768
Azote.....	1,000 297		

**Indices de réfraction de quelques liquides
par rapport à l'air à 20° et 76^{cm}.**

LONGUEURS D'ONDE en millièmes de millimètre.	ALCOOL MÉTHYLIQUE. Variation pour 1° : - 0,0004.	EAU. Variation pour 1° : - 0,00009.	CHLORAL (1).
	Indice à 20°.	Indice à 20°.	Indice à 20°.
671 ^{μμ} (Li)	1,3274	1,33085	1,4525
589 (Na)	1,3298	1,33303	1,4557
535 (Tl)	1,3302	1,33493	1,4590
397 (raie H)	1,3396	1,34340	1,4679

LONGUEURS D'ONDE en millièmes de millimètre.	SULFURE DE CARBONE. Variation pour 1° : - 0,0008.	NAPHTALINE MONOBROMÉE. Variation pour 1° : - 0,0004.
	Indice à 20°.	Indice à 20°.
671 ^{μμ} (Li)	1,61736	1,651
589 (Na)	1,62839	1,662
535 (Tl)	1,63929	1,673
397 (raie H)	1,70103	1,734

(1) L'addition au chloral d'une quantité convenable de glycérine fournit un liquide dont l'indice moyen et la dispersion sont extrêmement voisins de ceux du verre.

Pouvoir rotatoire du quartz.

Variation relative pour un échauffement de 1°... 0,00014

LONGUEURS D'ONDE en millièmes de millimètre.	ROTATION A 20° pour une épaisseur de 1 ^{cm} .	LONGUEURS D'ONDE en millièmes de millimètre.	ROTATION A 20° pour une épaisseur de 1 ^{cm} .
671 ^{μμ} (Li)	163°	535 ^{μμ} (Tl)	283°
589 (Na)	216°, 7	397 (raie H)	511°

Pouvoir rotatoire du sucre de canne

A 20°, une solution aqueuse contenant 16^g, 29 de sucre dans 100^{cm}³, observée dans un tube de 20^{cm} de longueur, produit, sur la lumière du sodium, la même rotation qu'une lame de quartz de 1^{mm} d'épaisseur.

Variation relative de la rotation pour un échauffement de 1°... 0,00037

A., II.

Dispersion rotatoire du sucre de canne.

LONGUEURS d'onde.	$671^{\mu\mu}$ (Li).	$589^{\mu\mu}$ (Na).	$535^{\mu\mu}$ (Ti).	$397^{\mu\mu}$ (raie H).
$\frac{\alpha_{\lambda}}{\alpha_D}$	0,75	1	1,23	2,33

Dispersion anormale.

*Indices de réfraction de la vapeur de sodium
au voisinage de la raie D₁D₂.*

LONGUEURS D'ONDE.	$n_{\text{sodium}} - n_{\text{air}}$.	LONGUEURS D'ONDE.	$n_{\text{sodium}} - n_{\text{air}}$.
$590,58^{\mu\mu}$	+0,00019	$589,20^{\mu\mu}$	+0,00066
589,80	+0,00066	589,13	+0,00153
589,61	+0,00133	589,00 (D ₂)	de + ? à - ?
589,60 (D ₁)	de + ? à - ?	588,82	-0,00135
589,51	-0,00067	588,50	-0,00051
589,48	-0,00034	587,45	-0,00020
589,40	$\mp 0,00000$		

Dispersion anormale.

*Indices de réfraction et coefficients d'absorption
de la cyanine solide (1).*

LONGUEUR D'ONDE en millièmes de millimètre.	INDICE DE RÉFRACTION.	COEFFICIENT D'ABSORPTION.
$400^{\mu\mu}$	1,69	0 (?)
450	1,60	$1 \cdot 10^4$ (?)
500	1,32	$3 \cdot 10^4$
528	1,18 minimum	$9 \cdot 10^4$
550	1,26	$14 \cdot 10^4$
570	1,46	$16,6 \cdot 10^4$ maximum
600	1,80	$14 \cdot 10^4$
645	2,23 maximum	$5 \cdot 10^4$
650	2,22	$4 \cdot 10^4$
700	2,05	$1 \cdot 10^4$

(1) L'intensité d'un faisceau lumineux traversant, sous l'incidence normale, une épaisseur du milieu égale à d centimètres est réduite dans le rapport de 1 à e^{-Kd} ; K est alors le coefficient d'absorption.

**Pouvoirs inducteurs spécifiques de quelques corps
par rapport à l'air.**

Vide.....	0,9994(?)	Huiles.....	3 environ
Air.....	1	Résines, ébonite.....	3 environ
Essence de térébenthine, benzine, pétroles.....	2 environ	Soufre, charges lentes..	4 environ
Soufre, charges rapides (10 ⁻⁸ seconde).....	2,6	Quartz.....	4,5
Verre, charges rapides (10 ⁻⁸ seconde).....	2,7	Verre, charges lentes...	5 à 8
		Mica.....	8
		Alcool éthylique.....	25
		Eau.....	80

Charges résiduelles du mica.

TEMPS DE CHARGE.	CHARGE RÉSIDUELLE en centièmes de la charge totale.
0,001	1,8
1	3,4
1000	6,2

Potentiels de rupture de quelques diélectriques.

	ÉPAISSEUR.	POTENTIEL DE RUPTURE en volts par millimètre d'épaisseur.
	mm	volts
Verre.....	1	> 20 000
Ébonite.....	1	> 50 000
Mica.....	1	> 50 000.
Micanite.....	1	> 40 000
Papier paraffiné.....	0,1	< 40 000
Huiles diverses.....	10	environ 7 000

Production des effluves ou des étincelles dans l'air.

vers 20°.

PRESSION en centimètres de mercure.	CHAMP CRITIQUE en volts par centimètre.	PRESSION en centimètres de mercure.	CHAMP CRITIQUE en volts par centimètre.
76	30000	0,5	400
4	2000	0,025	130 minimum
2	1100	0,002	400
1	650	0,0007	1200

Champ magnétique terrestre.

Valeurs moyennes au 1^{er} janvier 1904.

LIEUX D'OBSERVATION.	DÉCLINAISON. Le nord magnétique est à l'ouest du nord géographique. <i>Diminution annuelle:</i> 3', 5. Variation diurne moyenne : + 5' - 3'. Perturbations : ± 60'.	INCLINAISON. <i>Diminution annuelle:</i> 2', 5. Variation diurne moyenne : + 4' - 2'. Perturbations : ± 30'.	COMPOSANTE HORIZONTALE. <i>Augmentation ann.:</i> 0,0003. Variation diurne moyenne : ± 0,0004. Perturbations : ± 0,004.
Alger	12.35	53.46	0,254 C. G. S.
Perpignan	13.25	59.50	0,225 »
Nice	11.47	60.1	0,224 »
Nancy	12.52	64.22	0,200 »
Paris	14.37	64.44	0,198 »
Brest	17.29	65.18	0,195 »
Lille	14.27	65.53	0,192 »

Influence du champ magnétique sur la résistance du bismuth.

La résistivité du bismuth augmente environ de 0,37 pour 100 quand la température s'élève de 1° C.

INTENSITÉ du champ magnétique.	RÉSISTANCE vers 20° C.	INTENSITÉ du champ magnétique.	RÉSISTANCE vers 20° C.
0 C.G.S.	1	10000 C.G.S.	1,48
2000 »	1,04	15000 »	1,78
4000 »	1,13	20000 »	2,09
6000 »	1,24	30000 »	2,70
8000 »	1,36	40000 »	3,37

Saturation magnétique.

Fer très doux.....	$B = H + 24\,000$	Cobalt.....	$B = H + 16\,000$
Fer forgé ou acier doux	$B = H + 20\,000$	Fonte.....	$B = H + 15\,000$
		Nickel.....	$B = H + 6\,000$

**Perméabilité magnétique vers 20° C.
de quelques corps peu magnétiques.**

Eau	$B = H(1 - 0,000\,01)$
Air	$B = H(1 + 0,000\,000\,4)$
Oxygène.....	$B = H(1 + 0,000\,002)$
Solution de sulfate ferreux ($d = 1,2$).....	$B = H(1 + 0,000\,2)$
Air liquide.....	$B = H(1 + 0,002\,5)$
Bismuth	$B = H(1 - 0,000\,2)$

**Propriétés magnétiques d'un échantillon de fer doux
et d'un échantillon d'acier recuit.**

Fer doux.

H.	B.	μ .	B (résiduel).	H pour la désaimantation.	DISSIPATION D'ÉNERGIE par cycle en ergs par centimètre cube.
0,01	2	200	"	"	"
0,2	80	400	"	"	"
0,5	330	660	"	"	"
1	1450	1450	700	-0,6	300
2	4800	2400	3500	-1,3	1600
5	9900	1980	8600	-1,5	5000
10	13000	1300	11700	-1,8	7500
20	14600	730	13300	-1,9	9000
50	16000	320	14700	-2	10500
∞	20000 + H	1	15000	"	"

Acier recuit.

H.	B.	μ .	B (résiduel).	H pour la désaimantation.	DISSIPATION D'ÉNERGIE par cycle en ergs par centimètre cube.
5	400	80	"	"	1000
10	1600	160	700	-5	8000
20	6200	310	4900	-14	26000
50	12000	240	9100	-17	75000
∞	14000 + H	1	10000	"	"

Dissipation d'énergie par hystérésis,
en ergs par centimètre cube et par cycle.

$$\frac{W}{V} = \eta (B_{\max.})^{1,6}$$

	VALEURS du coefficient η .		VALEURS du coefficient η .
Fer très doux.....	0,002	Acier doux.....	0,008
Tôles de transforma- teurs	0,003	Fonte.....	0,013
		Acier fondu trempé....	0,025

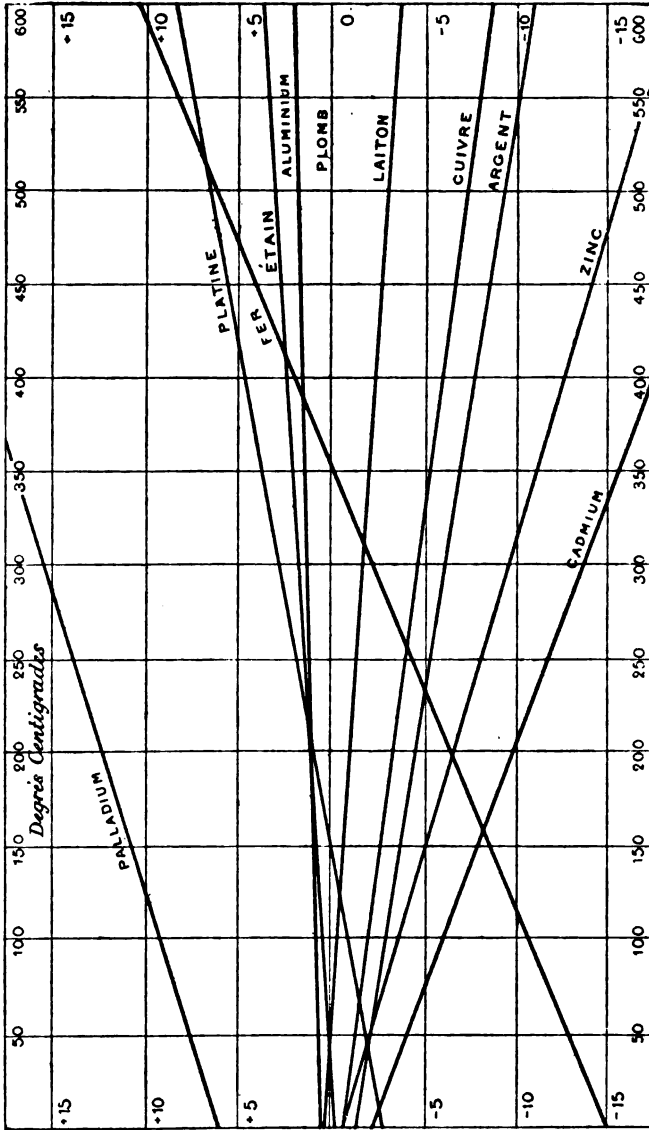
Électrolyse.

Quantité de matière mise en jeu par un courant de 1 ampère.

1 coulomb = 1^{ms},118 d'argent.

	VALENCE.	MASSE atomique.	PAR MINUTE.	PAR HEURE.
Hydrogène.....	1	1	0 ^{ms} , 6215	0 ^s , 03729
Oxygène.....	2	15,88	1 ^{ms} , 987	0 ^s , 5922
Volume d'hydrogène à 0° et 76 ^{mm} ..	»	»	6 ^{cm} ³ , 938	416 ^{cm} ³ , 3
Volume d'oxygène à 0° et 76 ^{mm} ..	»	»	3 ^{cm} ³ , 469	208 ^{cm} ³ , 15
Chlore.....	1	35,18	5 ^{ms} , 62	0 ^s , 337
Argent.....	1	107,12	67 ^{ms} , 08	4 ^s , 025
Aluminium.....	3	26,9	5 ^{ms} , 62	0 ^s , 337
Cuivre (sels cuivriques).....	2	63,1	19 ^{ms} , 87	1 ^s , 192
Mercure (sels mercuriques)....	2	198,5	124 ^{ms} , 3	7 ^s , 458
Nickel.....	2	58,3	18 ^{ms} , 24	1 ^s , 094
Or.....	3	195,7	40 ^{ms} , 85	2 ^s , 451
Plomb.....	2	205,35	64 ^{ms} , 30	3 ^s , 858
Potassium.....	1	38,86	24 ^{ms} , 33	1 ^s , 460
Sodium.....	1	22,88	14 ^{ms} , 33	0 ^s , 860
Zinc.....	2	64,9	20 ^{ms} , 32	1 ^s , 219

Forces électromotrices thermoélectriques en microvolts.



Pour avoir en microvolts la force électromotrice du couple formé par deux métaux A et B dont les soldes sont aux températures centigrades t_1 et t_2 , on multiplie la différence $t_2 - t_1$ par la différence des ordonnées mesurées sur les courbes des métaux A et B pour la température moyenne $\frac{t_1 + t_2}{2}$.

Couple thermoélectrique à liquides.

Amalgame de zinc (à 5 pour 10000)
et solution de sulfate de zinc (saturée à 0° C.).

$$E_0^t = E_0^{100} (0,009233 t + 0,00000767 t^2),$$

$$E_0^{100} = 0^{\text{volt}}, 1167.$$

Chaleur dégagée par l'effet Peltier.

Pour deux métaux A et B pris à la température centigrade t , on relève sur le diagramme de la page précédente la différence des ordonnées des courbes A et B pour cette température. — La valeur obtenue, *exprimée en volts*, est ensuite multipliée par la température absolue ($t + 273$) et le produit représente, en *joules*, la quantité de chaleur dégagée par le passage d'un *coulomb*.

Forces électromotrices de quelques piles.

PILES.	FORCE ÉLECTROMOTRICE.
	volts
Étalon Latimer Clark international	1,434 [1 - 0,00077 (t - 15)]
Étalon Weston (étalon au cadmium)	1,019 [1 - 0,00004 (t - 15)]
Étalon Gouy (SO ⁴ Zn à 10 pour 100)	1,386 [1 - 0,00015 (t - 15)]
Étalon Kelvin (pile Daniell : SO ⁴ Cu, D = 1,10)	1,072 [1 - 0,00016 (t - 15)]
» (» SO ⁴ Zn, D = 1,40)	
Daniell (SO ⁴ Zn, D = 1,2; SO ⁴ Cu, D = 1,2)	1,099
Bunsen (1 st SO ⁴ H ² + 12 st H ² O; et Az O ³ H, D = 1,38)	1,86
» (1 st SO ⁴ H ² + 12 st H ² O; et Az O ³ H fumant)	1,94
Bichromate (1 st SO ⁴ H ² + 12 st H ² O + 12 st Cr ² O ⁷ K ²)	2,03
Leclanché	1,46
Volta	0,9 environ
Accumulateur (acide D = 1,22)	2,1
» (acide D = 1,18)	2,0
Capacité d'un accumulateur	10 ampères-heures au kilogramme environ

**Résistance des fils de cuivre commercial
dit « de haute conductibilité ».**

Résistivité à 0° C. = 1,6 microhm-centimètre. Densité = 8,9.

DIAMÈTRE en millimètres.	SECTION en millimètres carrés.	MASSE en grammes par mètre.	LONGUEUR en mètres par kilogramme.	RÉSISTANCE en ohms par kilomètre.	LONGUEUR en kilomètres par ohm.
0,1	0,0079	0,0699	14306,0	2034,2	0,00049
0,2	0,0314	0,2796	3576,5	508,23	0,00197
0,3	0,0707	0,6291	1589,6	226,02	0,00442
0,4	0,1257	1,1184	894,13	127,14	0,00787
0,5	0,1963	1,7475	572,24	81,367	0,01229
0,6	0,2827	2,5164	397,39	56,504	0,01770
0,7	0,3848	3,4251	291,96	41,514	0,02409
0,8	0,5027	4,4736	223,53	31,784	0,03146
0,9	0,6362	5,6619	176,62	25,113	0,03982
1,0	0,7854	6,9900	143,06	20,342	0,04916
1,1	0,9503	8,4580	118,23	16,811	0,05551
1,2	1,1310	10,066	99,348	14,126	0,07079
1,3	1,3273	11,813	84,651	12,036	0,08308
1,4	1,5394	13,700	72,990	10,378	0,09635
1,5	1,7671	15,728	63,582	9,0407	0,11061
1,6	2,0106	17,895	55,883	7,9460	0,12585
1,7	2,2698	20,201	49,502	7,0386	0,14207
1,8	2,5447	22,648	44,155	6,2783	0,15928
1,9	2,8353	25,234	39,629	5,6348	0,17747
2,0	3,1416	27,960	35,765	5,0854	0,19664
2,1	3,4636	30,826	32,440	4,6126	0,21680
2,2	3,8013	33,832	29,558	4,2028	0,23794
2,3	4,1548	36,977	27,044	3,8453	0,26006
2,4	4,5239	40,263	24,837	3,5315	0,28316
2,5	4,9087	43,688	22,800	3,2547	0,30725
2,6	5,3093	47,253	21,163	3,0091	0,33232
2,7	5,7256	50,957	19,624	2,7904	0,35838
2,8	6,1575	54,802	18,248	2,5946	0,38542
2,9	6,6052	58,786	17,011	2,4188	0,41344
3,0	7,0636	62,910	15,896	2,2550	0,44346
3,1	7,5477	67,174	14,887	2,1167	0,47243
3,2	8,0425	71,578	13,971	1,9865	0,50340
3,3	8,5530	76,122	13,137	1,8679	0,53535
3,4	9,0792	80,805	12,375	1,7597	0,56829
3,5	9,6211	85,628	11,678	1,6605	0,60231
3,6	10,1788	90,591	11,039	1,5666	0,63712
3,7	10,7521	95,694	10,451	1,4859	0,67300
3,8	11,3412	100,94	9,907	1,4087	0,70987
3,9	11,9459	106,32	9,406	1,3374	0,74773
4,0	12,5664	111,84	8,941	1,2714	0,78656
4,1	13,2025	117,50	8,510	1,2101	0,82638
4,2	13,8544	123,30	8,110	1,1532	0,86719
4,3	14,5220	129,24	7,737	1,1001	0,90897
4,4	15,2053	135,33	7,390	1,0507	0,95174
4,5	15,9043	141,55	7,065	1,0045	0,99549
4,6	16,6190	147,91	6,761	0,96133	1,0402
4,7	17,3494	154,41	6,476	0,92085	1,0859
4,8	18,0956	161,05	6,209	0,88289	1,1327
4,9	18,8574	167,83	5,958	0,84722	1,1803
5,0	19,6350	174,75	5,722	0,81367	1,2290

**Résistance des fils de cuivre commercial
dits « de haute conductibilité » (suite).**

DIAMÈTRE en millimètres.	SECTION en millimètres carrés.	MASSE en grammes par mètre.	LONGUEUR en mètres par kilogramme.	RÉSISTANCE en ohms par kilomètre.	LONGUEUR en kilomètres par ohm.
5,1	20,4282	181,81	5,500	0,78207	1,2787
5,2	21,2372	189,01	5,291	0,75055	1,3324
5,3	22,0618	196,35	5,093	0,72416	1,3809
5,4	22,9022	203,83	4,917	0,69759	1,4335
5,5	23,7583	211,45	4,729	0,67245	1,4871
5,6	24,6301	219,21	4,562	0,64865	1,5417
5,7	25,5176	227,11	4,403	0,62609	1,5972
5,8	26,4208	235,14	4,253	0,60489	1,6537
5,9	27,3397	243,32	4,110	0,58436	1,7113
6,0	28,2743	251,64	3,974	0,56505	1,7697
6,1	29,2247	260,10	3,845	0,54607	1,8992
6,2	30,1907	268,70	3,722	0,52918	1,8897
6,3	31,1725	277,43	3,605	0,51251	1,9512
6,4	32,1699	286,31	3,493	0,49662	2,0136
6,5	33,1831	295,33	3,386	0,48146	2,0770
6,6	34,2120	304,49	3,284	0,46697	2,1414
6,7	35,2565	313,78	3,187	0,45314	2,2068
6,8	36,3168	323,22	3,087	0,43992	2,2732
6,9	37,3930	332,80	3,005	0,42720	2,3405
7,0	38,4845	342,51	2,920	0,41514	2,4088
7,1	39,5928	352,37	2,838	0,40352	2,4782
7,2	40,7150	362,36	2,760	0,39239	2,5485
7,3	41,8539	372,50	2,685	0,38172	2,6197
7,4	43,0085	382,78	2,613	0,37138	2,6926
7,5	44,1786	393,19	2,545	0,36163	2,7653
7,6	45,3646	403,74	2,477	0,35218	2,8395
7,7	46,5663	414,44	2,413	0,34309	2,9147
7,8	47,7836	425,27	2,351	0,33435	2,9909
7,9	49,0167	436,25	2,292	0,32594	3,0681
8,0	50,2655	447,36	2,235	0,31784	3,1463
8,1	51,5300	458,62	2,181	0,31004	3,2254
8,2	52,8102	470,01	2,128	0,30252	3,3055
8,3	54,1061	481,54	2,077	0,29528	3,3866
8,4	55,4177	493,22	2,028	0,28829	3,4687
8,5	56,7450	505,03	1,980	0,28155	3,5518
8,6	58,0881	516,98	1,934	0,27501	3,6359
8,7	59,4468	529,08	1,890	0,26875	3,7209
8,8	60,8212	541,31	1,847	0,26268	3,8070
8,9	62,2114	553,68	1,806	0,25661	3,8940
9,0	63,6173	566,19	1,766	0,25113	3,9820
9,1	65,0388	578,85	1,728	0,24564	4,0710
9,2	66,4761	591,64	1,690	0,24033	4,1609
9,3	67,9291	604,57	1,654	0,23519	4,2519
9,4	69,3978	617,64	1,619	0,23021	4,3438
9,5	70,8822	630,85	1,585	0,22539	4,4367
9,6	72,3823	644,20	1,552	0,22072	4,5306
9,7	73,8981	657,69	1,521	0,21620	4,6255
9,8	75,4297	671,32	1,490	0,21180	4,7213
9,9	76,9769	685,09	1,460	0,20755	4,8182
10,0	78,5398	699,00	1,431	0,20342	4,9160

**Résistivité de quelques échantillons de corps solides
à différentes températures.**

TEMPÉRATURE centigrade.	100°.	0°.	- 100°.	- 182°.	- 197°.	VALEUR moyenne du coefficient de température entre - 100° et + 100°.
<i>Résistivité en unités C. G. S. électromagnétiques.</i>						
Aluminium pur écroui .	4745	3161	1928	894		0,00446
Argent pur	2139	1559	962	472		0,00377
Cuivre pur recuit.....	1920	1349	757	272	178	0,00431
Étain pur.....	13870	9570	5670	2550		0,00428
Fer pur recuit.....	13970	8610	4010	1067	608	0,00578
Nickel (du nickel car- boxylé).....	19300	12270	6110	1900		0,00538
Or pur	2665	1948	1207	604		0,00375
Platine recuit.....	10910	8220	5295	2821	2290	0,00341
Platine rhodié (90° Pt + 10° Rh).....	18420	13750	9830	7130		0,00312
Maillechort.....	35700	34500	33280	32512		0,00035
Platine argent (2° Ag + 1° Pt).....	27400	26820	26110	25540		0,00024
Charbon d'une lampe à incandescence.....	3800000	3950000	4080000	4200000		-0,00031
Charbon d'un autre type de lampe.....	6200000	6400000	6500000			-0,00029

Variations de résistance de la manganine avec la température (1).

Résistivité à 0° C. = 2,33.

TEMPÉRATURE centigrade.	VARIATION RELATIVE de résistivité pour une variation de température de 1° C.	TEMPÉRATURE. centigrade.	VARIATION RELATIVE de résistivité pour une variation de température de 1° C.
15°.....	+ 0,000025	45°.....	0,000000
25°.....	+ 0,000014	55°.....	- 0,000003
35°.....	+ 0,000003	65°.....	- 0,000004

(1) 84° Cu + 12° Mn + 4° Ni.

Échauffement des conducteurs.

	DENSITÉ USUELLE DES COURANTS.
Fils de cuivre nus exposés à l'air.....	6 ampères par millimètre carré
Fil de cuivre nu noirci de 2 ^{mm} de diamètre chauffant de 80°.....	18 " "
Fil de cuivre nu noirci de 10 ^{mm} de diamètre chauffant de 80°.....	5 " "
Fils placés dans des locaux fermés, isolement léger.....	4 " "
Fils placés dans des locaux fermés, isolement au caoutchouc.....	2,5 " "
Câbles à isolement très fort ou sous plomb, section comprise entre 10 ^{mm} ² et 200 ^{mm} ²	3 à 1,5 " "
Câbles à isolement très fort ou sous plomb, section supérieure à 200 ^{mm} ²	1,5 à 0,75 " "

Conductibilités moléculaires limites
de quelques solutions aqueuses.

Une solution aqueuse contient m molécules-grammes du corps dissous dans un gramme de la solution. La résistance d'une colonne de longueur l^{cm} et de section s^{cm^2} étant de R ohms, la Table donne les valeurs

limites de $\frac{1}{m} \cdot \frac{l}{Rs}$ pour m tendant vers zéro.

NaOH	215	Na Cl	110	Az O ³ Az H ⁴	128
KOH	235	K Cl	131	Az O ³ Ag	116
Az H ⁴ OH	234	Az H ⁴ Cl	130	$\frac{1}{2}$ (SO ⁴ Na ²)	112
H Cl	373	$\frac{1}{2}$ (Zn Cl ²)	111	$\frac{1}{2}$ (SO ⁴ K ²)	137
Az O ³ H	373	Az O ³ Na	104	$\frac{1}{2}$ (SO ⁴ Cu)	117
$\frac{1}{2}$ (SO ⁴ H ²)	395	Az O ³ K	130	$\frac{1}{2}$ (SO ⁴ Zn)	115

Résistivité de quelques solutions aqueuses.

Les concentrations donnent la masse du corps dissous existant dans 100^e de la solution.

Les résistivités sont mesurées à 18°C., elles sont exprimées en *ohms-centimètre*.

Les résistivités diminuent de 2 à 3 *pour* 100 pour une élévation de température de un degré.

NaOH.		KOH.		HCl.		AzO ³ H.		SO ³ H.	
Pour 100.	Résistivité.	Pour 100.	Résistivité.	Pour 100.	Résistivité.	Pour 100.	Résistivité.	Pour 100.	Résistivité.
0,0005	70000	0,0005	63000	0,0005	20000	0,0005	34000	0,0005	28000
0,05	405	0,05	490	0,05	200	0,05	345	0,05	330
5	5,1	5	5,7	5	2,6	5	3,9	5	4,8
10	3,2	10	3,1	10	1,6	10	2,2	10	2,55
14	2,8 minimum	25	1,9 minimum	20	1,3 minimum	20	1,3 minimum	25	1,4
28	5,0	36	2,2	40	2,0	50	1,6	30	1,35 minimum
						99,5 (?)	5,1	50	1,85
								90	9,4
								99,7 (?)	12,6
NaCl.		KCl.		AzH ³ Cl.		SO ³ Cu.		SO ³ Zn.	
Pour 100.	Résistivité.	Pour 100.	Résistivité.	Pour 100.	Résistivité.	Pour 100.	Résistivité.	Pour 100.	Résistivité.
0,0005	95000	0,0005	115000	0,0005	70000	0,0005	11000	0,0005	130000
0,05	1250	0,05	1210	0,05	820	0,05	140	0,05	2200
5	15	5	14	5	11	5	53	5	52
10	8,3	6,95	10,2 sol. norm.	10	5,6	10	32	10	31
26	4,6 saturé	10	7,4	25	2,5	17,5	22	25	21
		18	3,8					35	29

Systeme des unités pratiques.

UNITÉ DE RÉSISTANCE.

L'ohm vaut 10^9 unités C. G. S. électromagnétiques.

L'*ohm international* (1893) est la résistance d'une colonne de mercure à 0° C. ayant une longueur de $106^{\text{cm}},3$ et une masse de $14^{\text{g}},4521$. Il paraît représenter l'*ohm vrai* à moins de $\frac{1}{10000}$ près.

$$\text{Ohm légal de 1884} = \frac{106}{106,3} \text{ ohm international,}$$

Ohm de l'Association britannique (B. A. U.) (1864) = $0,9866$ ohm intern.,

$$\text{Unité Siemens ou unité mercurielle} = \frac{100}{106,3} \text{ ohm international.}$$

UNITÉ D'INTENSITÉ.

L'ampère vaut 10^{-1} unité C. G. S. électromagnétique.

L'ampère est suffisamment bien représenté, pour les besoins de la pratique, par l'intensité d'un courant qui dépose par seconde $1^{\text{mg}},118$ d'argent dans un voltamètre contenant une solution à 10 pour 100 d'azotate d'argent.

UNITÉ DE QUANTITÉ.

Le coulomb est la quantité d'électricité débitée pendant une seconde par un courant de un ampère; il vaut 10^{-1} unité C. G. S. électromagnétique.

UNITÉ DE DIFFÉRENCE DE POTENTIEL.

Le volt est la force électromotrice nécessaire pour maintenir un courant de un ampère dans une résistance de un ohm; il vaut 10^8 unités C. G. S. électromagnétiques.

On satisfait suffisamment aux besoins de la pratique en admettant que, à 15° C., l'étalon Latimer Clarke vaut $1^{\text{volt}},434$.

Symboles des quantités physiques et abréviations d'unités

Recommandés par la Commission des Notations de la Chambre des Délégués du Congrès international des Électriciens de Chicago en 1893.

QUANTITÉS PHYSIQUES.	SYMBOLES.	ÉQUATIONS de définition.	DIMENSIONS des quantités physiques.	NOMS DES UNITÉS C. G. S.	ABRÉVIATIONS de C. G. S.	UNITÉS PRATIQUES.	ABRÉVIATIONS des unités pratiques.
Fondamentales.							
Longueur.....	L, l	"	L	Centimètre.	cm	Mètre.	m
Masse.....	M, m	"	M	Masse du gramme.	g	Masse du kilogramme.	kg
Temps.....	T, t	"	T	Seconde.	s	Minute, heure.	m; h
Géométriques.							
Surface.....	S, s	$S = L \cdot L$	L^2	Centimètre-carré.	cm ²	Mètre-carré.	m ²
Volume.....	V, v	$V = L \cdot L \cdot L$	L^3	Centimètre-cube.	cm ³	Mètre-cube.	m ³
Angle.....	α, β	$\alpha = \frac{\text{arc}}{\text{rayon}}$	Un nombre	Radian.	"	Degré, minute, seconde, grade.	"
Mécaniques.							
Vitesse.....	v	$v = \frac{L}{T}$	LT^{-1}	Centimètre par seconde.	cm. s	Mètre par seconde.	m : s
Vitesse angulaire.....	ω	$\omega = \frac{v}{L}$	T^{-1}	Radian par seconde.	"	Tour par minute.	t : m
Accélération.....	a	$a = \frac{v}{T}$	LT^{-2}	Centimètre par seconde par seconde.	cm. s ²	Mètre par seconde par seconde.	m : s ²
Force.....	F	$F = M \cdot a$	LMT^{-2}	Dyne.	dyne	Gramme; kilogramme.	g; kg
Énergie ou travail (<i>Work</i>).....	W	$W = F \cdot L$	L^2MT^{-2}	Erg.	erg	Kilogrammètre.	kgm
Puissance.....	P	$P = \frac{W}{T}$	L^2MT^{-3}	Erg par seconde	erg : s	Kilogrammètre par seconde.	kgm. s
Pression.....	p	$p = \frac{F}{S}$	$L^{-1}MT^{-2}$	Dyno par centimètre-carré.	dyne : cm ²	Kilogramme par centimètre-carré.	kg : cm ²
Moment d'inertie.....	K	$M \cdot L^2$	L^2M	Gramme-masse-centimètre-carré.	g-cm ²		
Magnétiques.							
Intensité de pôle.....	m	$F = \frac{m^2}{L^2}$	$L^{\frac{3}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}$	"	"		
Moment magnétique.....	\mathcal{M}	$\mathcal{M} = ml$	$L^{\frac{3}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}$	"	"		

Intensité de champ.....	$\mathcal{H} = \frac{F}{m}$	$L^{-1} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}$	Gauss.		
Flux de force magnétique.....	$\Phi = \mathcal{H} \cdot s$	$L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}$	Maxwell.		
Induction magnétique.....	$\mathcal{H} = \mu \mathcal{H}$	$L^{-1} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}$	Gauss.		
Perméabilité (magnétique)...	$\mu = \frac{\mathcal{H}}{\mathcal{H}}$	Un nombre	"		
Susceptibilité (magnétique)...	$\chi = \frac{\mathcal{H}}{\mathcal{H}}$	Un nombre	"		
Reluctivité (magnétique).....	$\nu = \frac{1}{\mu}$	Un nombre	"		
Reluctance (Résist. magnét.)...	$\mathcal{R} = \nu \frac{L}{S}$	L^{-1}	"		
Électromagnétiques.					
Résistance.....	$R = \frac{E}{I}$	LT^{-1}	"	Ohm.	ohm
Conductance.....	$G = \frac{1}{R}$	$L^{-1} T$	"	Mho.	mho
Force électromotrice.....	$E = RI$	$L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-2}$	"	Volt.	v
Différence de potentiel.....	$U = RI$	—	"	Volt.	v
Intensité de courant.....	$I = \frac{E}{R}$	$L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}$	"	Ampère.	A
Quantité d'électricité.....	$Q = IT$	$L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}}$	"	Coulomb; ampère-heure.	c; A-h
Capacité.....	$C = \frac{Q}{E}$	$L^{-1} T^2$	"	Farad.	F
Énergie électrique.....	$W = EIT$	$L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-2}$	"	Joule; watt-heure.	J; w-h
Puissance électrique.....	$P = EI$	$L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-3}$	"	Watt; kilowatt.	w; kw
Résistivité.....	$\rho = \frac{RS}{L}$	$L^2 T^{-1}$	"	Ohm-centimètre.	ohm-cm
Conductivité.....	$\gamma = \frac{1}{\rho}$	$L^{-2} T$	"	"	"
Coefficient d'induction.....	$L = \frac{\Phi}{I}$	L	"	Henry.	H
Force magnétisante.....	$\mathcal{H} = \frac{4\pi NI}{L}$	$L^{-\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}$	"	"	"
Force magnétomotrice.....	$\mathcal{F} = 4\pi NI$	$L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}$	"	Ampère-tour.	A-t

Pas d'abréviations.

Pas d'abréviations.

Pas d'unités pratiques

TABLE DES MATIÈRES.

Le premier nombre, en chiffres romains, désigne le volume.

Le second nombre, en chiffres arabes, désigne la page.

- Abaissement des points de congélation*, I, 189 ; I, 242.
Aberration chromatique d'un objectif photographique, II, 83 ; de l'œil, II, 104.
Aberrations de sphéricité, II, 72 à 75.
Absorption par la vapeur de sodium, II, 121 ; spectres d'absorption, II, 122 ;
absorption de l'infra-rouge, II, 128.
Accélération de la pesanteur à Paris, I, 235.
Accommodation, II, 97.
Accord parfait, II, 25.
Accumulateurs, II, 264 ; leur capacité, II, 425.
Acétylène, flammes manométriques, II, 14 ; lampe, II, 42.
Achromatisme des prismes, II, 112 ; d'une lunette, II, 112.
Aciers au nickel, II, 317.
Actinométrie, II, 129 ; II, 411.
Acuité visuelle, II, 103.
Adhérence des cordes, I, 89.
Affaiblissement d'un cliché photographique, II, 89.
Affûter une scie, I, 18 ; un rabot, I, 19.
Aimantation du fer et de l'acier, II, 309 ; courbes d'aimantation, II, 312, 324,
368 et 373 ; valeurs de l'aimantation, II, 421 et 422.
Aimant artificiel, II, 285 ; brisé, II, 287 ; moment magnétique, II, 293 ; champ
magnétique d'un aimant artificiel, II, 318 et 321 ; équivalent à un courant,
II, 343.
Alcoomètre. Vérifier la graduation d'un alcoomètre, I, 119.
Alliages fusibles, I, 36.
Allongement d'un fil métallique, I, 80 ; d'un ressort, I, 82.
Alphabet Morse, II, 329.
Aluminium. Ecrire sur le verre avec l'aluminium, I, 36 ; Soudure, I, 50.
Amalgamer un métal, I, 37.
Amalgames alcalins, II, 259.
Amortissement d'un mouvement oscillatoire, I, 102 ; Résistance proportionnelle
à la vitesse, I, 113 ; amortissement électromagnétique, II, 294 ; par l'induction,
II, 355.
Amortissement et synchronisation : Cas de deux pendules, II, 8.
Ampère. Définition de l'ampère, II, 429.
Ampèremètre. Etalonnage, II, 253 ; ampèremètre thermique, I, 178.
Ampoules à gaz raréfiés, II, 220.
Analyse d'un son, II, 40.
Analyseur des ondes polarisées sur une corde, II, 4 ; à vision directe, II, 134.

- Angles*, leur mesure, I, 60 ; angle limite, II, 58.
- Anneaux* de Newton, II, 142 et 143.
- Anneaux tourbillonnaires* de fumée, I, 151 ; liquides, I, 151.
- Apériodicité*, II, 355.
- Aplanétisme*, II, 71 ; d'un objectif photographique, II, 83.
- Appréciations sans appareils*, I, 54 et 56.
- Arcanson*, I, 37.
- Arc chantant*, II, 389.
- Arc électrique*, soufflage, II, 392.
- Arc-en-ciel*, II, 113.
- Archimède*. Principe d'Archimède, I, 118.
- Aréomètre*, I, 118.
- Aréomètres Baumé et densités*, I, 237.
- Argenture* du verre, I, 37 ; galvanique, II, 256.
- Armature* d'une machine dynamo. (*Voyez* induit.)
- Arracher un clou*, I, 88.
- Ascensions et dépressions capillaires*, I, 155 à 158.
- Assembler deux planches*, I, 20.
- Astatiques*. Systèmes astatiques, II, 281 et 296.
- Astigmatisme*, II, 101 ; d'un objectif photographique, II, 83.
- Atelier*, I, 1.
- Attractions et répulsions électrostatiques*, II, 153 ; magnétiques, II, 287.
- Augmenter le diamètre d'un trou*, I, 5.
- Autocollimation* pour les miroirs, II, 56 ; pour les lentilles, II, 78.
- Aveugle*. Région aveugle de l'œil, II, 96.
- Balance*. Etude de la balance, I, 71 ; balance de démonstration, I, 71 ; balance sans plateaux, I, 73 ; balance de laboratoire, I, 73.
- Balancement d'une masse d'eau*, I, 138.
- Balistique*, II, 225 ; II, 351.
- Baromètre*. Construction, I, 123 ; Baromètre arénoïde et à mercure, I, 124 ; application à la mesure des pressions, I, 132 ; applications et corrections, I, 235.
- Battements*. Sons de battements, II, 24 ; battements et vitesse du son, II, 21.
- Batteries de condensateurs*, II, 189 et 209.
- Bélier hydraulique*, I, 147.
- Besicles*, II, 97.
- Bichromate*. Procédés photographiques au bichromate, II, 91.
- Biflaire*, suspension, I, 112.
- Bitume*. Procédé photographique au bitume, II, 93.
- Blanc d'ordre supérieur*, II, 139.
- Bleu*. Les bleus en photographie, II, 91.
- Bobine en bois*, I, 27.
- Bobine d'induction*, II, 392 ; charge des condensateurs, II, 209.
- Bois*. Travail à l'établi, I, 16 ; le tourner, I, 25 ; travail au tour, I, 25 ; bois fendif, I, 38.
- Boîte à pont*, II, 233 ; boîte de résistances, II, 234.
- Bonhomme d'Ampère*, II, 286.
- Border un tube de verre*, I, 30.
- Boussoles*, II, 286 et 297.
- Boussole d'inclinaison*, II, 302.
- Boussole des tangentes*, II, 302 ; sa constante, II, 353.

- Brasure*, I, 9.
Brûlures, soins à donner, I, 38.
Bulles de savon. Déformation d'une bulle de savon, I, 170; pression dans les bulles de savon, I, 168.
- Calage des balais*, II, 369.
Caléfaction, I, 210.
Calibre à coulisse, I, 61.
Calorifères, I, 186.
Calorimétrie, I, 211; des décharges électriques, II, 197.
Capacité d'un condensateur, II, 185; d'un accumulateur, II, 266 et 425; capacité et oscillations, II, 390.
Capillaires. Tubes capillaires, I, 155.
Capillarité, I, 152; corrections du baromètre, I, 235.
Capsules manométriques. (Voir *Flammes manométriques*.)
Caoutchouc. Entretien du caoutchouc, I, 38.
Caractéristique à circuit ouvert, II, 366; II, 373.
Caractéristique en charge avec excitation constante, II, 369; avec excitation en dérivation, II, 369.
Carillon électrique, II, 195.
Caustiques des miroirs, II, 71; des lentilles, II, 73.
Centres de gravité, I, 69; ses déplacements, I, 69.
Centre optique d'un miroir, II, 56.
Chaleur utilisée par un brûleur, I, 215.
Chaleurs de fusion, de dissolution, de réaction, I, 215; I, 242.
Chaleur de vaporisation de l'eau, I, 216; de quelques liquides, I, 243.
Chaleur spécifique absolue d'un liquide, I, 212, 213; du mercure, I, 213; de l'eau, I, 213; d'un solide, I, 214; des gaz, leur rapport, I, 220; de l'eau, ses variations, I, 241; de quelques solides et de quelques gaz, I, 241.
Chalumeau, I, 28.
Chambre noire. Images dans la chambre noire, II, 44.
Champ d'une lunette, II, 79; d'un objectif photographique, II, 82; de l'œil, II, 96.
Champ électrique, II, 161; ses lignes de force, II, 164; forces exercées sur un diélectrique, II, 191.
Champs magnétiques. Composition des champs magnétiques, II, 291; mesures d'intensité, II, 288; exploration du champ magnétique, II, 306; forces exercées par le champ magnétique, II, 309; mesure des champs magnétiques intenses, II, 317, 320 et 323; d'un aimant, II, 318 et 321; d'un électro-aimant, II, 319 et 323; d'un solénoïde, II, 319 et 322; d'un courant, II, 333; d'un courant rectiligne, II, 333; d'un courant circulaire, II, 335; d'une bobine agissant à grande distance, II, 337; action sur un courant, II, 340; champ démagnétisant, II, 325.
Champs magnétiques alternatifs, II, 383.
Champs magnétiques tournants, II, 384.
Champ terrestre. Action purement directrice, II, 295; Mesure de $\frac{M}{H}$, II, 298; mesure par l'électrolyse, II, 302; induction par le champ terrestre, II, 352; valeur du champ terrestre en différents lieux, II, 420.
Charges électriques. Leurs signes, II, 156; leur mesure, leur partage, II, 169; équivalence des charges électriques positive et négative, II, 177; proportionnalité aux potentiels, II, 185; pénétration des charges électriques, II, 193; charges électriques dans les aigrettes, II, 212; dans la flamme, II, 216.

- Chatterton*, I, 39.
- Chaud*. Sensations de chaud, I, 172.
- Choc*, I, 114 à 116; choc d'un jet liquide, I, 146.
- Chronographe*, I, 100; applications, I, 101 à 103; compter les vibrations sonores, II, 26 et 27.
- Chute des corps*, I, 96 à 99; vitesse limite, I, 149.
- Cinématique*, I, 96.
- Circulation d'eau*, I, 186.
- Coefficients* de conductibilité, I, 243; de compressibilité, I, 234; d'élasticité, I, 234; de frottement, I, 234; de dilatation linéaire, I, 238; de dilatation cubique de quelques gaz et de quelques liquides, I, 239; d'induction mutuelle, II, 325.
- Cohéreur à limaille*, II, 398.
- Coincidences*. Méthode des coïncidences, I, 103.
- Colle* d'amidon, I, 39 et 40; colle forte, I, 40; colle forte liquide, I, 40; colle imputrescible, I, 40.
- Coller* des planches, I, 20; les métaux et le verre, I, 39; un miroir de galvanomètre, I, 39; le celluloïd, I, 39.
- Collimation*. Erreur de collimation, I, 53.
- Combustibles*. Pouvoirs calorifiques, I, 242.
- Commutateur*, II, 225, 294, 312, 357.
- Composition* des forces, I, 66; de deux mouvements vibratoires rectangulaires, II, 9 à 13; des champs magnétiques, II, 291.
- Compressibilité* de l'air, I, 198; de la vapeur d'éther, I, 199; de l'anhydride carbonique, I, 200; coefficients de compressibilité, I, 234.
- Compression adiabatique d'un gaz*, I, 220.
- Compte-gouttes*, I, 160.
- Compteur* à gaz, I, 144; compteur à secondes, II, 298; compteur de tours, II, 367; compteur d'électricité, II, 378 et 387.
- Condensation* des vapeurs par les gaz ionisés, II, 219.
- Condensateur* pour l'électroscope, II, 168; capacité d'un condensateur, II, 185; étalon, II, 187; condensateurs en cascade et en surface, II, 189 et 200; les charger avec une bobine d'induction, II, 209; condensateur associé au galvanomètre balistique, II, 225; condensateurs industriels, II, 225; pour hautes tensions, II, 395.
- Conducteurs*. Leur électrisation, II, 154; conducteur complètement fermé, II, 158; incomplètement fermé, II, 159; constance du potentiel, II, 170; conducteurs médiocres, II, 201; couplage, II, 241; conducteurs à résistance constante, II, 277; conducteur dans un champ magnétique alternatif, II, 383; échauffement des conducteurs et densités de courants, II, 429.
- Conductibilité* thermique, I, 222 et 243; conductibilité électrique des flammes, II, 214; conductibilité moléculaire des électrolytes, II, 429. (Voyez aussi *résistivité*).
- Conduction* de la chaleur, I, 221; dans les corps anisotropes, I, 223.
- Conservation du flux*, II, 308.
- Conservation du fer*, I, 50.
- Constante* d'un galvanomètre, II, 353.
- Constantes critiques*, I, 244.
- Contrôle* de masses graduées, I, 73.
- Convection*. Courants de convection, I, 186, 222 et 225.
- Convection électrique* dans les gaz, II, 210.
- Convergence des rayons*, II, 54; convergence d'une lentille, II, 67.

- Cordes*, vibrations transversales, II, 34 ; variations longitudinales, II, 38.
- Corps d'épreuve*, II, 160 et 169.
- Corps flottants*, I, 137 et 154.
- Correction* des échelles thermométriques, I, 239 ; de capillarité pour le baromètre, I, 235 ; des différentes vues, II, 97 ; de l'astigmatisme, II, 103.
- Couleurs*, leur addition, II, 108 ; leur contraste, II, 110 ; couleurs complémentaires, II, 110 et 125 ; analyse et synthèse, II, 124 ; couleurs en lumière monochromatique, II, 123 ; couleurs simples, leur invariabilité, II, 131. (*Voir* aussi dispersion et spectroscopie.)
- Coulomb*. Lois de Coulomb en électricité statique, II, 161 ; loi de Coulomb en magnétisme, II, 288.
- Coulomb*. Définition du coulomb, II, 429.
- Couper* une lame de métal, I, 3 ; un tube de métal sur le tour, I, 15 ; un tube de verre ou un flacon, I, 29 et 40 ; un carreau de verre, I, 40.
- Couplage* des conducteurs, II, 241 ; des piles, II, 272.
- Couple* exercé par un moteur, II, 376.
- Couple thermoélectrique*, II, 282 ; couples à liquides, II, 425.
- Courant d'air*, I, 148 ; vitesse, I, 148 et 186.
- Courants* de convection, I, 186 ; de charge et de décharge, II, 201 ; courants dérivés, II, 231 ; effets calorifiques des courants, II, 277 ; leurs champs magnétiques, II, 333 ; force exercée par le champ sur un courant, II, 340 ; courants de Foucault, II, 356 ; durée d'établissement, II, 362 ; continuation d'un courant par self-induction, II, 362 ; triphasés, II, 382 ; de haute fréquence, II, 391 et 394 ; densités usuelles, II, 429.
- Courants alternatifs*. Redressement des courants alternatifs, II, 274 ; courants alternatifs et self-induction, II, 363 ; interrupteurs électrolytiques, II, 365 ; propriétés générales, II, 379 à 385 ; leur période, II, 380 ; leur production, II, 381 ; leur transformation, II, 382.
- Courber* un tube de verre, I, 29 ; un métal, I, 41.
- Courbes de Lissajous*, II, 9 ; leur observation optique, II, 11.
- Courbure des images*, II, 69.
- Couronnes*, II, 149.
- Crayon* pour écrire sur verre, I, 41.
- Creuser* une planche, I, 22.
- Cristallisation*, I, 196. (*Voir* aussi fusion, surfusion et sursaturation.)
- Critique*. Constantes critiques, I, 244.
- Cryoscopie*, I, 189 ; tableaux numériques, I, 242.
- Cuivrage*, II, 256.
- Déboucher un flacon*, I, 41.
- Décapage*, I, 42 ; pour l'électrolyse, II, 255.
- Décharges résiduelles*, II, 195 ; électroscope à décharges, II, 204 ; mesure calorimétrique de l'énergie des décharges, II, 197 ; phénomènes de fusion, II, 201 ; courant de décharge, II, 201 ; sa durée, II, 206 ; son intensité, II, 207 ; électrolyse par les décharges, II, 209 ; décharges par les pointes, II, 210 ; par les gaz ionisés, II, 216 ; dans les gaz raréfiés, II, 220 ; décharges oscillantes, II, 396.
- Découper* une plaque de métal, I, 14.
- Déformation* pendant le choc, I, 116.
- Degrés*, grades et radians, I, 233 ; degrés Baumé et densités, I, 237.
- Déclinaison*, II, 296.
- Décomposition* d'une veine liquide en gouttes, I, 160 ; d'un système vibrant, II, 3 ; d'un sulfate alcalin, II, 258.

- Démagnétisant.* Champ démagnétisant, II, 325.
- Démarrage* d'un moteur, II, 366; d'un moteur synchrone, II, 382 et 383.
- Densités*, I, 117; d'un corps solide, I, 117; d'un liquide, I, 118; densités de l'eau, I, 238; maximum de densité de l'eau, I, 182; densités des solutions de sulfate de sodium, I, 194; valeurs des densités pour quelques solides, I, 236; pour quelques solutions aqueuses, I, 237; degrés Baumé, I, 237; densités usuelles des courants électriques, II, 429.
- Déperdition électrique*, II, 169.
- Déplacement* d'une source sonore, II, 21.
- Dépressions* dans les tubes capillaires, I, 156.
- Dessiner* sur le verre, I, 42.
- Détente* adiabatique, refroidissement, I, 220.
- Déviations* des décharges par l'aimant, II, 221; déviations des aimants, II, 290.
- Développement* d'un cristal, I, 193 et 197; développements en photographie, II, 88.
- Dévisser* une vis bloquée, I, 42.
- Diapason.* Application à l'analyse des sons, II, 41; entretien électrique, II, 328.
- Diathermane.* Corps diathermane, II, 128.
- Diélectrine*, I, 42.
- Diélectriques*, II, 190; forces exercées par le champ, II, 191; pénétration des charges, II, 193; localisation de l'énergie, II, 194.
- Diffraction*, II, 6 et 145; par une petite ouverture, II, 145; par une ouverture allongée, II, 146; par une fente, II, 147; par le bord d'un écran, II, 147; par deux petites ouvertures, II, 149; par un petit écran, II, 149; par un fil fin, II, 150; par deux fentes, II, 150; par un réseau, par une étoffe, II, 151; interférence des rayons diffractés, II, 149.
- Différentiel.* Galvanomètre différentiel, II, 235.
- Diffusion* de l'hydrogène, I, 144 et 145; diffusion de la lumière, II, 52.
- Dilatations*, I, 176; des solides, I, 176 et 179; d'un tube de laiton, I, 176; d'un fil métallique, I, 177; du caoutchouc, I, 179; dilatation absolue des liquides, I, 180; dilatation apparente, I, 181; dilatation de l'eau, I, 238; Coefficients de dilatation, I, 238 et 239.
- Dilatation d'un gaz.* Dilatomètres à poids et à tige, I, 184; augmentation de pression à volume constant, I, 185.
- Dilatomètres*, I, 181.
- Dimensions*, II, 432.
- Diminuer* un cliché photographique, II, 89.
- Dispersion*, II, 111; dispersion anormale, II, 418. (Voir aussi indices de réfraction.)
- Disque stroboscopique*, II, 367.
- Dissolution*, I, 194; chaleur de dissolution, I, 215.
- Distance focale* d'un objectif photographique, II, 81.
- Distillation*, I, 208.
- Distorsion* d'un objectif photographique, II, 83.
- Distribution électrique*, II, 158.
- Dorure*, II, 255; II, 257.
- Double réfraction*, II, 135.
- Dresser* le bout d'un cylindre, I, 12.
- Durée* de la décharge disruptive, II, 206; durée d'établissement d'un courant, II, 362.
- Dynamique*, I, 104.
- Dynamomètre.* Pendule dynamométrique, I, 67; I, 78; dynamomètre à ressort, I, 83.
- Dynamo-frein*, II, 375.
- Dynamos*, II, 365 à 371.

- Eau.* Maximum de densité, I, 182 ; abaissement du point de congélation, I, 189 ; variations de chaleur spécifique, I, 241.
- Eau de savon*, I, 166.
- Ebonite*, I, 43.
- Ébullition*, I, 205 ; ébullition et pression maximum, I, 205 ; ébullition sous pression réduite, I, 205 ; ébullition d'un ensemble de deux liquides, I, 206 ; retards à l'ébullition, I, 206 ; quelques températures d'ébullition, I, 240 ; élévation de la température d'ébullition, I, 243. (*Voir* aussi Tonométrie.)
- Echelles thermométriques*, I, 239.
- Eclairement.* Loi du carré des distances, II, 47 ; loi du cosinus de l'angle d'incidence, II, 48.
- Eclat*, II, 49 ; minimum perceptible par l'œil, II, 105 ; valeurs numériques des éclats de différentes sources, II, 413.
- Écoulement d'eau.* Machine électrique à écoulement d'eau, II, 182.
- Écoulement* d'un liquide par un orifice en mince paroi, I, 139 ; d'un gaz, I, 142.
- Ecrans* électriques, II, 165 et 180 ; magnétiques, II, 310.
- Ecrire* sur le verre, I, 36.
- Écrouissage* et thermoélectricité, II, 281.
- Effet Joule*, II, 277 ; effet Peltier, II, 284 ; ses valeurs, II, 425 ; effet Thomson, II, 425.
- Elasticité*, I, 76 à 87 ; ellipse d'élasticité, I, 79 ; choc des corps élastiques, I, 114 ; coefficient d'élasticité, I, 234 ; limite d'élasticité, I, 234.
- Electricité statique*, II, 152.
- Électrisation*, II, 153 ; d'un conducteur, II, 154 ; développement simultané de deux électrisations, II, 156 ; électrisation par le contact, II, 158.
- Electro-aimant.* Son champ magnétique, II, 319 et 323 ; sa construction, II, 323 ; sa force portante, II, 323 et 326 ; applications, II, 327 à 332 ; électro-aimant polarisé, II, 330.
- Electrodes* et polarisation, II, 272 et 273.
- Electrodynamomètre*, II, 347.
- Electrolyse* par les décharges, II, 209 ; application de l'électrolyse aux mesures d'intensité, II, 232 ; ses lois, II, 250 ; réactions secondaires, II, 258 ; polarisation, II, 267 ; électrolyse dans les piles, II, 267 ; quantités de matière mise en jeu par l'électrolyse, II, 423.
- Electrolytes.* Résistance, II, 244 ; effets Joule dans les électrolytes, II, 280 ; interrupteurs électrolytiques, II, 363.
- Electromètre* à quadrants, II, 172 et 224 ; électromètre balance, II, 173.
- Electrophore*, II, 185.
- Electroscope* à balle de sureau, II, 153 ; électroscope à feuille d'or, II, 165 ; sa sensibilité, II, 168 et 223 ; son emploi comme électromètre, II, 168 ; sa graduation, II, 168, 183, 187 ; influence sur l'électroscope, II, 176 ; capacité de l'électroscope, II, 187 ; électroscope condensateur, II, 168 ; électroscope à décharge, II, 204 ; électroscope à pointe, II, 211.
- Élément de courant*, II, 340.
- Élévations moléculaires* du point d'ébullition, I, 20 ; tableau numérique, I, 243.
- Emission.* Influence de l'angle d'émission sur l'intensité, II, 49 ; émission du corps noir, II, 412.
- Empois d'amidon*, I, 43.
- Encre* pour écrire sur le verre, I, 43 ; encre indélébile, I, 43 ; encre pour polycopie, I, 44.
- Energie électrique*, II, 195.
- Entrefer*, II, 319 et 325.

- Entretien électrique d'un diapason*, II, 328.
Epaisseurs, leur mesure, I, 60.
Epissures, I, 45.
Epreuves diapositives de couleur, II, 91.
Evaporation et refroidissement, I, 219; cas des calorimètres, I, 225.
Équilibre stable et instable, I, 70; équilibre sur le plan incliné, I, 90.
Équivalence de la chaleur et du travail, I, 211; équivalence des charges positives et négatives développées par influence, II, 177.
Équivalent mécanique de la calorie, sa mesure par un procédé électrique, I, 211; sa mesure par le frottement, I, 212.
Équivalents électrochimiques, II, 252.
Erreurs accidentelles et systématiques, I, 53; erreurs de collimation, I, 53 et 55.
Etabli, I, 16.
Étalonnement des résistances, II, 238; d'un ampèremètre, II, 253.
Étalons de force électromotrice, II, 260 et 425; étalons photométriques, ,
Etamer le verre, I, 44.
Etirer un fil, I, 7.
Etoile polaire, II, 297.
Évaluation des températures élevées, I, 240.
Excitation des machines dynamos et des moteurs, II, 369, 370 et 377.
Exploration du champ magnétique avec la boussole, II, 306.

Facteur de puissance, II, 389.
Faraday. Lois de Faraday, II, 252.
Fente lumineuse, II, 146.
Fermes, I, 77.
Fibre, I, 44.
Figuration électrochimique des lignes équipotentielles, II, 260.
Figures électriques, II, 194.
Fil à plomb. Niveau à fil à plomb, I, 70.
Fileter, I, 6; fileter au tour, I, 14.
Filière, I, 6.
Fixage en photographie, II, 89.
Flammes manométriques, II, 14; flammes sensibles, II, 20; flammes chantantes II, 30; conductibilité des flammes, II, 215.
Flexion. Lois de la flexion, I, 76 à 79.
Flottants. Équilibre des corps flottants, I, 137 et 154.
Fluorescence, II, 132.
Flux magnétique. Mesure en valeur absolue, II, 322; flux magnétique dans l'électro-aimant, II, 323.
Flux maximum. Règle du flux maximum, II, 343.
Focales. Lignes focales des miroirs et des lentilles, II, 73.
Fonctions circulaires. Leurs valeurs naturelles de degré en degré, I, 231; de grade en grade, I, 232.
Fontaine à deux liquides, I, 140; fontaine lumineuse, II, 64.
Forces capillaires, I, 157.
Force coercitive, II, 314.
Forces concurrentes, I, 66; parallèles, I, 68; forces pendant le choc, I, 116.
Force contre-électromotrice, II, 371, 372 et 378.
Forces électromotrices. Leur comparaison, II, 228; forces électromotrices de polarisation, II, 269 et 273; forces électromotrices thermo-électriques, II, 280;

- diagramme** de ces forces électromotrices, II, 424 ; forces électromotrices de quelques piles, II, 425.
- Force portante** d'un électro-aimant, II, 323 et 326.
- Formation** des gouttes, I, 158 ; d'un accumulateur, II, 265.
- Fractionnement** de la décharge, II, 392.
- Fraiser**, I, 22.
- Franges de diffraction**, II, 147.
- Frapper une carafe**, I, 219.
- Frein électrodynamique**, II, 375.
- Fréquence** des oscillations électriques, II, 390.
- Fresnel**. Miroirs de Fresnel, II, 140.
- Froid**. Sensation de froid, I, 172 ; froid produit par la vaporisation, I, 218 ; froid produit par la détente, I, 220 ; mélanges réfrigérants, I, 191.
- Frottement**, I, 75 ; intérieur, I, 76 ; des corps solides, I, 87 ; de glissement, I, 87 ; des poulies, I, 91 ; de roulement, I, 87 ; d'un liquide, I, 93 ; des fluides, I, 93 ; d'un gaz, I, 94 ; coefficients de frottement, I, 234 ; frottements dans un moteur électrique, II, 376.
- Fusion**, I, 187 ; chaleur de fusion, I, 215 et 242 ; températures de fusion, I, 240 ; fusion produite par une décharge, II, 201.
- Galvanomètres**. Balistique, II, 225 et 351 ; de Nobili, II, 230 ; graduation d'un galvanomètre par l'électrolyse, II, 233 ; différentiel, II, 235 ; différentiel et self-induction, II, 363 ; résistance d'un galvanomètre, II, 241 ; galvanomètre à cadre mobile, II, 346 ; mesure de la constante d'un galvanomètre, II, 353.
- Galvanoplastie**, II, 255.
- Gaz**. Pesanteur et densité des gaz, I, 120 ; principe d'Archimède, I, 137 ; tourniquet à gaz, I, 141 ; écoulement par un orifice, I, 142 ; compteurs, I, 144 ; dilatations, I, 184 et 185 ; liquéfaction, I, 199 ; compressibilité, I, 198 ; coefficients de dilatation, I, 239 ; chaleurs spécifiques, I, 241.
- Gaz tonnant**, II, 379.
- Gazomètre**, I, 129.
- Glaces sans tain**, II, 53 et 54 ; glaces platinées, II, 140.
- Glissement des courroies**, I, 44.
- Glu marine**, I, 44.
- Gomme bichromatée**, II, 93.
- Gomme-laquer le verre**, I, 44.
- Goniomètre**, II, 60.
- Gouttes liquides**. Formation des gouttes liquides, I, 158 ; leur poids, 159 ; imitation de leur formation, I, 159 ; liquides de densités voisines, I, 160 ; leurs déformations, I, 165.
- Grades**, degrés et radians, I, 233.
- Grands nombres**. Loi des grands nombres, I, 54.
- Grimpement des sels**, II, 264.
- Groupement des rayons**, II, 69.
- Halo** des plaques photographiques, II, 88.
- Harmoniques**. Sons harmoniques, II, 28 et 30 ; harmoniques des cordes vibrantes, II, 36 et 409.
- Haute fréquence**, II, 391.
- Haute tension**, II, 391.
- Hauteurs**, leurs mesures par le baromètre, I, 235.

- Hauteur des sons*, leur mesure, II, 24 à 27; mesure absolue, II, 36; valeurs numériques, II, 409.
- Héliographe*, II, 130.
- Horloge à sable*, I, 139.
- Hydrodynamique*, I, 138.
- Hydrostatique*, I, 117.
- Hygrométrie*, I, 204.
- Hypermétropie*, II, 97.
- Hystérésis*, II, 314; sa disparition, II, 315; son influence dans les moteurs, II, 373; valeur des pertes par l'hystérésis, II, 423.
- Illusions produites par les glaces sans tain*, II, 53.
- Images dans la chambre noire*, II, 44; leur séparation dans les lunettes, II, 50: images dans les miroirs, 53, 55 et 56; images aériennes, II, 57; formation des images dans les lentilles, II, 66; courbure des images, 69; images virtuelles dans les lentilles, II, 70; images dans le prisme, II, 74; mise au point, II, 78; distorsion, II, 83; images dans l'œil, II, 94; irisations, II, 112.
- Imitation des phénomènes de réfraction dans l'œil*, II, 100; de l'astigmatisme, II, 102; de la décharge par les ions, II, 219.
- Impressions phototypiques*, II, 92.
- Inclinaison*, II, 299; sa mesure par l'induction, II, 352.
- Indicateurs de pôles*, II, 258.
- Indice de réfraction*, mesure par la réflexion totale, II, 63; mesure par le goniomètre, II, 61; par les procédés graphiques, II, 60; valeurs numériques, II, 415.
- Induction*. Bobines d'induction, II, 209 et 392; induction magnétique, II, 320: mesure des flux magnétiques, II, 323; coefficients d'induction, II, 325; induction par variations de perméabilité, II, 330; ses lois, II, 351; induction par le champ terrestre, II, 352; induction dans un disque tournant, II, 353; dans un cadre mobile, II, 354; dans les masses métalliques, II, 356; induction mutuelle de deux circuits, II, 357.
- Induit*. Réaction d'induit, II, 369, 370 et 378.
- Induit de dynamo*. Son emploi comme transformateur, II, 385.
- Influence du déplacement de la source sur la hauteur d'un son*, II, 21; diverses sur la hauteur d'un son, II, 30; diverses sur les vibrations des verges, II, 39; influence électrique sur l'électroscope, II, 170; sur un corps isolé, II, 177; à l'intérieur d'un conducteur creux, II, 179; sur les conducteurs en communication avec les parois de la salle, II, 180; machines électriques à influence, II, 181.
- Infra-rouge*, II, 125; réflexion, II, 126; réfraction, II, 128; absorption, II, 128.
- Inscription électrochimique des courants*, II, 258:
- Instabilité*, I, 70.
- Instruments d'optique*, II, 76.
- Intensité lumineuse*; sa mesure, II, 48; variations avec l'angle d'émission, II, 49.
- Intensité d'un courant*, sa mesure par une durée de décharges, II, 203; intensité du courant de décharge, II, 207; conservation dans les courants dérivés, II, 231; mesure par l'électrolyse, II, 232 et 252.
- Intensité du champ magnétique*, II, 288; composante horizontale, mesure de MH et de $\frac{M}{H}$, II, 298; intensité d'un champ magnétique intense, sa mesure, II, 317, 320 et 323.
- Intensité d'aimantation*, II, 315.

- Interférences* des ondes à la surface de l'eau, II, 6; mécanisme des interférences sonores, II, 21 et 23; interférences de la lumière, II, 140; en lumière monochromatique, II, 143; interférences des rayons diffractés, II, 149.
- Interpoler*, II, 239.
- Interrupteur*, II, 361 (*voir* commutateur); interrupteurs électrolytiques, II, 363; interrupteurs électrolytiques sans platine, II, 365.
- Intervalles musicaux*, II, 25, 410.
- Inversion* du couple fer-cuivre, II, 284.
- Iodure* sensible à l'action de la chaleur, II, 126; iodure de potassium amidonné, II, 209.
- Ionisation* par les aigrettes, II, 211; par les flammes, II, 216; par le phosphore, les rayons X et le radium, II, 218.
- Ions*, mobilité dans l'électrolyse, II, 254; ions colorés, II, 255.
- Irradiation*, II, 104.
- Isolants*, II, 152; leur résistance, II, 204.
- Jaugeages* par des pesées, I, 65.
- Jet d'eau*, I, 147.
- Jeu de dés*, I, 54; jeu de l'aiguille, I, 55.
- Lame à faces parallèles*, II, 59.
- Lames minces* en lumière monochromatique, II, 144; lames minces d'huile dans l'eau, I, 165; d'eau de savon, I, 166.
- Lampe* à acétylène, II, 42; lampe à incandescence, intensité et rendement, II, 279.
- Lanterne magique*, lanterne de projections, II, 68.
- Lentilles*, II, 42; lentilles diaphragmées, II, 51; images dans les lentilles, II, 66; convergence et grossissement des lentilles, II, 67; lentilles associées, II, 71; aberrations et focales, II, 73; lentilles cylindriques, II, 74.
- Levier optique*, I, 62.
- Lignes de force* du champ électrique, II, 164; du champ magnétique, II, 305; du champ d'un courant, II, 336 et 338.
- Lignes équipotentielles* d'une nappe de courant, II, 231; figuration électrochimique, II, 260; lignes équipotentielles dans un électrolyte, II, 271.
- Lignes focales*, II, 72.
- Limer*, I, 2.
- Liquéfaction des gaz*, I, 198.
- Liquides*. Densité, I, 118; pression dans les liquides, I, 132; écoulement par un orifice, I, 139 et 145; choc de la veine, I, 146; viscosité superficielle, I, 154; liquide glycérique de Terquem, I, 166; dilatation, I, 180; surchauffe, I, 206; chaleur spécifique, I, 212 et 241; quelques densités, I, 236; coefficients de dilatation cubique, I, 239; chaleur de vaporisation, I, 243.
- Logarithmes*, I, 230.
- Longueur* d'une ligne droite, I, 56; d'une ligne courbe, I, 58; longueur d'onde de la lumière, II, 150 et 414.
- Lunettes*. Construire une lunette schématique, II, 77; lunette astronomique, son étude, II, 77 à 81; lunette de Galilée, II, 81; pouvoir séparateur d'une lunette, II, 146.
- Machine d'Atwood*, I, 104.
- Machines à influence*, à addition, II, 181; à multiplication, II, 183; à écoulement d'eau, 182 et 184; machines à influence à secteurs, II, 175; machines à influence et téléphone, II, 208.

- Machine dynamo*, II, 365.
Magnéto, II, 371.
Magnétomètre, II, 291.
Magnétisme résiduel, II, 314.
Manipulateur du télégraphe, II, 329.
Manipulations photographiques, II, 88.
Manomètres, I, 119; manomètre barométrique, I, 123 et 126; manomètre à deux liquides, I, 130; manomètre à poids à membrane, I, 126; appareil à piston, I, 128.
Mariotte. Vase de Mariotte, I, 140.
Masses et accélération, I, 104; comparaison par la machine d'Atwood, I, 107; par les vibrations élastiques, I, 108; masses graduées, leur contrôle, I, 73 et 74.
Mastics divers, I, 45 et 46.
Maximum de densité de l'eau, I, 182; de l'eau salée, I, 238.
Mécanique, I, 66.
Mélanges réfrigérants, I, 191.
Membranes d'huile dans l'eau, I, 165; manomètres à membranes, I, 126; membrane exploratrice des pressions, I, 134; membranes semi-perméables, I, 171.
Ménisques convexes, I, 153.
Mercure. Nettoyage du mercure, I, 46.
Méridien magnétique, II, 296; méridien géographique, II, 297.
Métallisation, II, 255.
Métaux. Travail à l'étau, I, 1; travail au tour, I, 9; les noircir, I, 47; décapage, I, 42 et II, 255.
Microfarad, II, 226.
Micromètre à étincelles, II, 174.
Microphone hydraulique, I, 162; entretien d'un diapason par le microphone, II, 328; II, 331.
Microscope, II, 76.
Mirage. Imitation du mirage, II, 65.
Miroir tournant mù à la main, II, 15; miroirs plans, II, 53 et 54; miroirs courbes, II, 54; aberrations caustiques et focales, II, 71; Miroir de Fresnel, II, 140; Miroir de galvanomètre, I, 39.
Mise au point d'une image, II, 78.
Mobilité des ions, II, 254.
Moléculaires. Abaissement des points de fusion, I, 190 et 242; élévation des points d'ébullition, I, 207 et 243.
Moletter, I, 11.
Moment magnétique, II, 293 et 315.
Monochromatique. Corps colorés en lumière monochromatique, II, 123; Interférences en lumière monochromatique, II, 144.
Moteur à courant continu, mise en route, II, 366; moteur shunt, II, 366; moteur marchant à vide, II, 371; moteur taré, II, 375; moteur en charge, II, 377; moteur synchrone, II, 382; moteur à champ tournant, II, 384.
Moulage, II, 255.
Mouvements en chute libre, I, 96 et 99; sur le plan incliné, I, 98; mouvements variés, I, 96; mouvements volontaires, leur étude, I, 97; mouvement oscillatoire amorti (enregistrement), I, 102; mouvement circulaire, I, 107; quantité de mouvement, I, 116 et 146; mouvements des fluides, I, 138; mouvements tourbillonnaires des fluides, I, 151; mouvement relatif et figures de Lissajous, II, 10; mouvement résultant et figures de Lissajous, II, 11.
Myopie, II, 97.

- Nappes de courant*, II, 229 et 272.
Neige carbonique, I, 218.
Nettoyage du mercure, I, 46.
Newton. Anneaux de Newton, II, 142.
Nickelage, II, 255 et 257.
Nicol, Prisme de Nicol, II, 136.
Niveau, I, 62; niveau avec fil à plomb, I, 70; niveau d'eau, I, 135.
Nœuds, II, 29.
Noircir les métaux, I, 47.

Objectif photographique, II, 81 à 85.
Objet virtuel dans les lentilles, II, 70;
Obturateur photographique, II, 84.
Oculaire. Cercle oculaire d'une lunette, II, 79.
Œil. Sa position dans les lunettes, II, 79; formation des images, II, 94; champ, II, 99; région aveugle, II, 96; marche des rayons, II, 96; œil diaphragmé, II, 99; œil artificiel, II, 100; imperfections optiques, II, 101; aberrations chromatiques, II, 104; sensibilité, II, 105.
Ohm. Lois de Ohm, II, 227; détermination de l'ohm, II, 352 à 359.
Ombres, II, 43; ombres colorées, II, 50; ombre géométrique et diffraction, II, 6 et 148.
Ondes longitudinales, II, 1; ondes stationnaires, II, 33; ondes sur une corde, II, 3; à la surface de l'eau, II, 4; ondes transversales, II, 3; polarisées, II, 4; ondes sonores, leurs interférences, II, 21 à 23.
Ophthalmoscope, II, 94.
Opposition des potentiels, II, 226; du flux induit et du flux inducteur, II, 355.
Optique, II, 42.
Oscillations électriques, II, 389.
Osmose. Régulateur à osmose, II, 220.
Ouverture utile d'un objectif photographique, II, 82.

Palmer, I, 61.
Pantographe élastique, I, 83.
Paraffiner le bois, le papier, etc., I, 47.
Partage des charges électriques, II, 170.
Pâte pour polycopie, I, 44 et 48; pâte à porcelaine, I, 47.
Pendule, I, 108; pendule dynamométrique, I, 67; pendule simple et mesure de g , I, 108; pendule composé, I, 111; pendule sphérique, I, 110; amortissement et synchronisation de deux pendules, II, 8; pendule à sable et figures de Lissajous, II, 11; application des mouvements pendulaires aux mesures électriques, II, 162.
Pénétration des charges, II, 193.
Pénombres, II, 44.
Peltier. Effet Peltier, II, 284.
Perméabilité des lames minces, I, 168.
Perçer des trous dans le bois et dans le liège, I, 22; dans un métal à l'archet, I, 4, au tour, I, 12; à l'emporte-pièce, I, 5; dans le verre, I, 48.
Perce-verre, II, 193.
Percussions, I, 114.
Période d'un courant alternatif, II, 380; des oscillations lentes, II, 390.
Perte de charge dans un tuyau, I, 140.

- Perte de vitesse* d'une veine liquide, I, 146.
- Pertes d'énergie* dans un moteur électrique à vide, II, 373; dans un transformateur, II, 388.
- Pesanteur*. Chute des corps, I, 96 à 108; pesanteur des gaz, I, 120; valeur de g à Paris, I, 235.
- Phase*. Variations de phase dans la synchronisation et la résonance, II, 6 et 8.
- Phonographe*, II, 41.
- Phosphorescence*, II, 131.
- Photographie*. Sensibilité des plaques, II, 86; manipulations diverses et papiers photographiques, II, 88; étude de l'objectif, II, 81 à 85; rapidité de l'obturateur, II, 84; photographie d'un spectre, II, 120.
- Photogravure*, II, 94.
- Photomètre* à écran diffusant, II, 45; à ombres, II, 45; à tache translucide, II, 46; à bille d'acier, II, 47.
- Photométrie hétérochrome*, II, 50.
- Phototypie*, II, 92.
- Piano*. Complexités des sons émis, II, 40; échelle des sons, II, 409.
- Pied à coulisse*, I, 61.
- Piles*. Différences de potentiel, II, 223; piles de charge, II, 224; résistance des piles, II, 242 et 271; piles étalons, II, 260; Weston, II, 260; Gouy, II, 261; Daniell, II, 262; pile à grand débit, II, 262; Leclanché, II, 263; Bunsen, II, 263; couplage des piles, II, 272; pile à concentration, II, 275; pile thermo-électrique, II, 280; pile flottante, II, 344; forces électromotrices de diverses piles, II, 425.
- Pince à tourmalines*, II, 136.
- Pivots*. Supports à pivots, II, 287, 297.
- Plan incliné*. Équilibre sur le plan incliné et réactions, I, 90.
- Plaques photographiques*. Sensibilité et solarisation, II, 86; manipulations diverses, II, 88.
- Platine*. Le souder au verre, I, 35; platine platiné, II, 243.
- Plâtre gommé*, I, 48.
- Plasticité* de la glace, I, 189.
- Plus grand commun diviseur* de deux longueurs, I, 57.
- Point zéro* des thermomètres, I, 173.
- Point de fusion*, I, 187 et 240; de solidification, I, 187 à 191; de rosée, I, 204; point critique, I, 244; mise au point d'une image, II, 78; point conséquent d'un aimant, II, 288.
- Pointes*. Décharge par les pointes, II, 210.
- Polaire*. Détermination du méridien avec l'étoile polaire, II, 297.
- Polarisation* des ondes sur une corde, II, 4; polarisation par réflexion, II, 133; polarisation chromatique, II, 138; polarisation rotatoire, II, 138 et 417; polarisation des piles, II, 228; des piles et accumulateurs, II, 268 à 270; d'un voltamètre, II, 272, 275; de l'aluminium, II, 273.
- Pôles*. Indicateurs de pôles, II, 258; pôles des aimants, II, 286.
- Polycopie*. Encre pour polycopie, I, 44; pâte, I, 44, 48.
- Pont à fil*, II, 239.
- Pont de Wheatstone*, II, 234, 237, 248; expériences d'induction, II, 361.
- Positifs* en photographie, II, 90.
- Potentiel électrique*, II, 168; sa constance sur la surface d'un conducteur, II, 170; potentiels explosifs, II, 174, 419 et 420; potentiel dans les phénomènes d'influence, II, 178 et 179; proportionnalité à la charge, II, 185; égalisation des potentiels dans la décharge, II, 201; leur distribution le long d'un fil,

II, 202 et 226; dans les piles, II, 223; dans une nappe de courant, II, 229; dans une pile en activité, II, 271.

Potentiel magnétique et travail, II, 308.

Potentiomètre à boîtes de résistances, II, 229; à fil, II, 229.

Poulie. Construction d'une poulie, I, 27; frottement, I, 91; rendement, I, 92; poulie différentielle, I, 93.

Poussée hydrostatique, I, 118; dans un liquide, I, 136; dans un gaz, I, 137.

Pouvoirs calorifiques de quelques combustibles, I, 242; pouvoir émissif, I, 224; pouvoir inducteur spécifique, II, 190, 419; pouvoir réflecteur, II, 51; pouvoir séparateur, II, 80.

Pression atmosphérique, I, 122; pression d'un gaz, ses variations avec l'altitude, I, 126; manomètre, I, 126; transmission des pressions, I, 131; pression dans un liquide, I, 132; pression du sable, I, 134; pressions dans une veine liquide, I, 145; dans les bulles de savon, I, 168; augmentation de pression d'un gaz à volume constant, I, 185; pression maxima des vapeurs et ébullition, I, 200 et 205; pression maxima de la vapeur d'eau, I, 243; pressions critiques, I, 244.

Principe d'Archimède, I, 118.

Prismes, II, 42, réflexion totale, II, 64, focales et foyers, II, 74; réfraction dans les prismes, II, 60; mesure des angles et de l'indice, II, 61; prismes de Nicol, II, 136; prismes biréfringents, II, 137.

Probabilités, I, 54.

Procédés graphiques pour l'étude de la réflexion, II, 53, 55; pour l'étude de la réfraction, II, 59; pour l'étude des lentilles, II, 70.

Procédé photographique à la gélatine bichromatée, à la gomme bichromatée, II, 91 à 95.

Propagation de la chaleur, I, 224; rectiligne de la lumière, II, 43; propagation curviligne de la lumière, II, 65; propagation des ondes, modèles mécaniques, II, 1; propagation des ondes à la surface de l'eau, II, 5.

Projecteurs. Leur photométrie, II, 51.

Projections. Lampe de projection, II, 47 et 68; images des miroirs, II, 57; instruments d'optique, II, 76; réflexion totale, II, 64; arc-en-ciel, II, 114; spectre, II, 118; polarisation, II, 137; anneaux de Newton, II, 142; diffraction, II, 145; électroscope, II, 167; ombre de gaz chauds, II, 217; expériences stroboscopiques, I, 164, et II, 381.

Psychromètre, I, 204.

Puissance électrique. Méthode des trois voltmètres, II, 388; méthode des trois ampèremètres, II, 389; wattmètres et compteurs, II, 387 et 388.

Pulvérisateur, I, 146.

Punctum cæcum, II, 96; proximum, II, 97, remotum, II, 97.

Quantité de mouvement. Dans le choc des solides, I, 116; dans le choc d'une veine liquide, I, 145.

Quartz fondu, I, 49; polarisation rotatoire du quartz, II, 138.

Raboter, I, 19.

Radians. Grades et degrés, I, 233.

Radiographie, II, 223.

Rapidité d'un obturateur instantané, II, 84.

Rapport des chaleurs spécifiques d'un gaz, I, 220; des unités électriques, II, 411.

Rayons efficaces, II, 113; ordinaire, extraordinaire, II, 137; cathodiques, II, 221;

- rayons X, II, 222. (*Voyez*: groupement, convergence, réflexion, réfraction, retour inverse.)
- Réaction* dans le principe d'Archimède, I, 137; chaleur de réaction, I, 215; réactions secondaires dans l'électrolyse, II, 258; réactions d'induit, II, 369, 370, et 378.
- Recettes diverses*, I, 36.
- Rectification* d'un mélange alcoolique, I, 208.
- Redressement* des courants alternatifs, II, 274.
- Redresser* une tige de laiton, I, 48; un tube, I, 48.
- Réflexion* des ondes, II, 8; du son, II, 19 et 20; réflexion du son à la surface de l'eau, II, 52; lois de la réflexion, II, 52; réflexion totale, II, 63; réflexion de l'infra-rouge, II, 126; réflexion partielle et totale, II, 415.
- Réfraction* dans l'eau, II, 58; dans le verre, II, 59; dans une lame à faces parallèles, II, 59; dans le prisme, II, 60; réfraction de l'infra-rouge, II, 128; double réfraction, II, 135; double réfraction accidentelle, II, 140.
- Réfrigération*, I, 191.
- Refroidissement*. Vaporisation adiabatique et neige carbonique, I, 218; évaporation et refroidissement, I, 219; refroidissement d'un calorimètre, I, 225.
- Regel*, I, 189.
- Régions polaires* des aimants, II, 286.
- Règle à calcul*, I, 57.
- Régulateurs de température*, I, 172.
- Relief*, II, 108.
- Rendement* de la lumière électrique, II, 279; d'un moteur, II, 374; d'une machine dynamo-génératrice, II, 375; d'un transformateur, II, 387; des appareils à haute tension, II, 377.
- Renforcement* d'un son, II, 23; renforcement d'un cliché, II, 89.
- Repères thermométriques*, I, 240.
- Reproduire* un dessin, II, 54; reproduire un réseau de diffraction, II, 92.
- Répulsions* électrostatiques, II, 153; répulsions magnétiques, II, 287.
- Réseau*, II, 150; reproduction d'un réseau, II, 77.
- Résistance* de l'air, I, 149 et 150; résistance des matériaux à la traction, I, 234; résistance calorifique apparente, I, 222; résistance des isolants, II, 204; boîte de résistance, II, 234; résistances graduées, II, 237; mesure de résistances par le galvanomètre différentiel, II, 236; par le pont de Wheatstone, II, 237; par le téléphone, II, 244 et 248; résistances très voisines, II, 239; résistance d'un galvanomètre, II, 241; d'une pile, II, 242 et 271; variation avec la température, II, 243 et 247; résistance des électrolytes, II, 244; résistances constantes, II, 277; résistance de l'induit d'une machine, II, 369; résistance du bismuth dans le champ magnétique, II, 421; résistance des fils de cuivre, II, 426 et 427.
- Résistivité*, II, 204; valeurs numériques, II, 428.
- Résonance* des vibrations longitudinales, II, 2; des vibrations transversales des cordes, II, 3 et 5; des vibrations d'un ressort, II, 6; des vibrations de l'air d'un flacon, II, 15; d'une cavité quelconque, II, 31; d'un tuyau sonore, II, 28 et 31; des cordes vibrantes, II, 36.
- Résonateurs*, II, 28; appareils semblables, II, 33.
- Ressort*. Fabrication d'un ressort, I, 15; vibrations et figures de Lissajous, II, 10 et 12; graduer un ressort, I, 67.
- Retards à l'ébullition*, I, 206.
- Rétine*. Ses propriétés, II, 105; persistance des impressions, II, 106; fatigue, II,

- Retour inverse* de la lumière, II, 58.
- Réversibilité* des machines électrostatiques, II, 195.
- Rhéostats*, II, 227, 365, 366; en fil de manganine, II, 227; rhéostats à liquides, II, 249.
- River*, I, 7.
- Roder le verre*, I, 50.
- Rosés*. Point de rosée, I, 204.
- Rotation continue* d'un aimant, II, 339; d'un électrolyte, II, 345.
- Rouge*. Température du rouge, I, 240.
- Rouille*, I, 50.
- Rupture*. Charges de rupture, I, 80 et 234.
- Sable*. Horloge à sable, I, 139; pression du sable, I, 134; pendule à sable, I, 110; pendule à sable et figure de Lissajous, II, 11.
- Saccharimètre*, II, 138.
- Saturation* des électro-aimants, II, 326.
- Scellements*, I, 24; alliage pour scellements, I, 36.
- Scier*. Les métaux, I, 3; le bois, I, 17.
- Sécheur de vapeur*, I, 216.
- Self-induction*, II, 359; self-induction et oscillations électriques, II, 390.
- Sensations* de chaud et de froid, I, 172; de couleur, II, 110.
- Sensibilité* des plaques photographiques, II, 85.
- Séparation* des images dans les lunettes, II, 80.
- Signe* des charges électriques, II, 156.
- Silice fondue*, I, 49.
- Siphonner un gaz*, I, 144.
- Sirène*, II, 24.
- Spectre d'émission* d'un métal, II, 116; projection d'un spectre, II, 118; spectre solaire, II, 119; photographie d'un spectre, II, 120; spectre d'absorption, II, 121 et 123; spectre infra-rouge, II, 125; spectres cannelés, II, 139; spectres dans le champ électrique, II, 165; spectres dans le champ magnétique, II, 305, 311; spectre magnétique du champ d'un courant, II, 338; répartition de l'énergie dans le spectre d'émission du corps noir, II, 412.
- Spectrophotomètre*, II, 50.
- Spectroscope*. Son réglage, II, 62, et II, 115.
- Spectroscopie*, II, 115; sensibilité des plaques photographiques aux diverses radiations, II, 86.
- Solarisation* des plaques photographiques, II, 85.
- Solénoïde*. Champ magnétique d'un solénoïde, II, 319 et 322; solénoïde orienté par le champ terrestre, II, 343.
- Solides*. Chaleurs spécifiques, I, 214 et 241; quelques densités, I, 236; coefficients de dilatation, I, 238.
- Solidification*, I, 187 à 191.
- Solubilité* du sulfate de sodium, I, 195.
- Son*. (Voyez Accords, analyse, battements, harmoniques, hauteur, intervalles, ondes, production, propagation, réflexion, synthèse, timbre, transmission.)
- Sonneries*, II, 327.
- Sonomètres*, II, 34.
- Souder* un métal, I, 8; le verre, I, 32, 33; le platine au verre, I, 35; le verre aux métaux, I, 50; l'aluminium, I, 50.
- Soufflage* de l'arc, II, 392.
- Soufflerie*, I, 27.

- Souffler le verre*, I, 32.
Sources quasi-ponctuelles, II, 43; II, 146.
Stabilité de l'équilibre, I, 70.
Statique, I, 66.
Stéréoscope, II, 108.
Stroboscopie, II, 367; décomposition d'une veine liquide, I, 162; stroboscopie en acoustique, II, 25; hauteur d'un son, II, 25; corde vibrante, II, 35; éclairage par courants alternatifs, II, 380.
Supports divers. — Tome I, figures, pages 23, 25, 67, 76, 81, 84, 93, 95, 110, 119, 128, 139, 156, 159, 161, 171, 174, 192, 218 et tome II, 5, 8, 67, 71, 100, 121, 139, 152, 153, 159, 175, 180, 188, 208, 213, 215, 216, 249, 274, 303, 310, 338, 342, 346.
Surchauffe des liquides, I, 206.
Surfaces. Mesures de surfaces, I, 64; surface de séparation, I, 134; surface libre, I, 134; surfaces équipotentielles, II, 171.
Surfusion de divers corps, I, 191 à 194.
Sursaturation de divers corps, I, 195; sursaturation des vapeurs, I, 203.
Suspension de l'eau sur un tulle, I, 155.
Synchronisation des vibrations longitudinales d'un ressort, II, 2; synchronisation par entretien électrique des vibrations, II, 6.
Synthèse d'un son, II, 40; synthèse des couleurs, II, 124.
Système astatique, II, 281 et 296.
Systèmes laminaires, I, 167.
- Tableaux numériques*, I, 227; II, 401.
Taches grasses, I, 50.
Tambour gradué, I, 50.
Taraud. Reconstituer un taraud, I, 51.
Tarauder, I, 6 et 13.
Télégraphe, II, 328; télégraphe sans fil, II, 398.
Téléphone, II, 330; téléphone à ficelle, II, 17; téléphone et machines électrostatiques, II, 208; téléphone pour la mesure des résistances, II, 244 et 248.
Températures. Températures de repère, I, 240; températures de fusion, I, 242, 243; températures critiques, I, 244; températures d'ébullition, I, 243; influence de ses variations sur les vibrations des corps sonores, II, 40; sur la résistance d'un conducteur, II, 243 et 247; mesure thermo-électrique, II, 283; détermination calorimétrique, I, 214; estimation au rouge, I, 240.
Tension superficielle, I, 152 et II, 340; égalité des tensions superficielles en tous sens, I, 153 et 164; mesure par le compte-gouttes, I, 158; mesure par la méthode de la large goutte, I, 164; mesure par les lames minces, I, 167; sa valeur pour quelques liquides, I, 236.
Thermocalorimètre, II, 198.
Thermo-électricité, II, 280; diagrammes thermo-électriques, II, 424.
Thermomètre. Construction d'un tube à thermomètre, I, 34; comparaison des thermomètres, I, 172.
Thermosiphon, I, 186.
Timbre des sons, II, 40.
Tirage des positifs sur papier, II, 90.
Tonométrie, I, 207; Tableau numérique, I, 243.
Torpille électrique, II, 206.
Torsion, I, 84; mesure d'un couple de torsion, I, 84 et 85.
Tour. Travail des métaux, I, 9; travail du bois, I, 25.

- Tourbillons* de camphre, I, 152; tourbillons de fumée, I, 151; tourbillons dans un liquide, I, 152.
- Tourmalines*. Pince à tourmalines, II, 136.
- Tourner* les métaux, I, 11; le bois, I, 25.
- Tourniquet* à gaz, I, 141; tourniquet hydraulique, I, 141; tourniquet électrique, II, 213.
- Traction*, I, 80; résistance à la traction, I, 234.
- Transformateur*, II, 385; transformateur à haute tension, II, 391; pour très haute tension, II, 397.
- Transformation* du fer au rouge, II, 316; transformation des courants alternatifs en continus, II, 274; transformations mutuelles des courants continus et des courants alternatifs, II, 382.
- Transformatrice*, II, 382.
- Transmission* des pressions, I, 131; de la chaleur, I, 221; des mouvements pendulaires, II, 8; transmission et réflexion du son, II, 15; transmission de l'énergie par les machines électrostatiques, II, 195; transmission du son par les corps solides, II, 15; par les fils, II, 16, 17 et 21; par les corps mous et corps liquides, II, 17; dans les gaz et dans les gaz raréfiés, II, 18; à travers les étoffes, II, 20.
- Transport* des poussières dans l'air vibrant, II, 33.
- Travail mécanique*. Méthode graphique, I, 74.
- Travaux d'atelier*, I, 1.
- Tréfiler*, I, 7.
- Trou tamponné*, I, 24.
- Tubes* à essais, I, 31; tubes capillaires, ascensions, I, 155; tubes à gaz raréfiés, II, 220, 396; tubes de Geissler, II, 396; tubes focus, II, 220 et 222.
- Tuyaux*. Pertes de charge dans les tuyaux, I, 140; tuyaux sonores ouverts et fermés, II, 28 à 30.
- Unités C.G.S.* et unités pratiques, II, 431 et 432.
- Vapeurs*. Densités, I, 121; compressibilité et liquéfaction, I, 199; pressions maxima, I, 200; pressions maxima dans l'air et dans l'air raréfié, I, 202; sur-saturation, I, 203; séchage de la vapeur, I, 216; vapeur d'eau dans l'air desséché chimiquement, II, 218; vapeur d'eau, pressions à différentes températures, I, 243; vapeur de mercure, pressions maxima, I, 244.
- Vaporisation*. Chaleur de vaporisation, I, 215; refroidissement par la vaporisation, I, 218.
- Variations* du poids d'un corps à la surface de la terre, I, 235; de hauteur du baromètre avec l'altitude, I, 235; de la chaleur spécifique de l'eau, I, 241; de la concentration au voisinage des électrodes, II, 253; de la composante horizontale du champ terrestre, II, 299; des résistances électriques avec la température, II, 243 et 247.
- Vases communicants*, I, 135; de Mariotte, I, 140.
- Veine liquide*. Vitesses et pressions dans une veine liquide, I, 145; choc, I, 146; décomposition en gouttes, I, 160; observation stroboscopique, I, 162.
- Vent électrique*, II, 212.
- Ventres*, II, 29, 36.
- Verges*. Vibrations longitudinales, II, 38; vibrations transversales, II, 39; influence d'une surcharge, II, 39; influence d'une variation de température, II, 40.
- Vérification* d'une série de masses graduées, I, 73; d'un alcoomètre et d'un

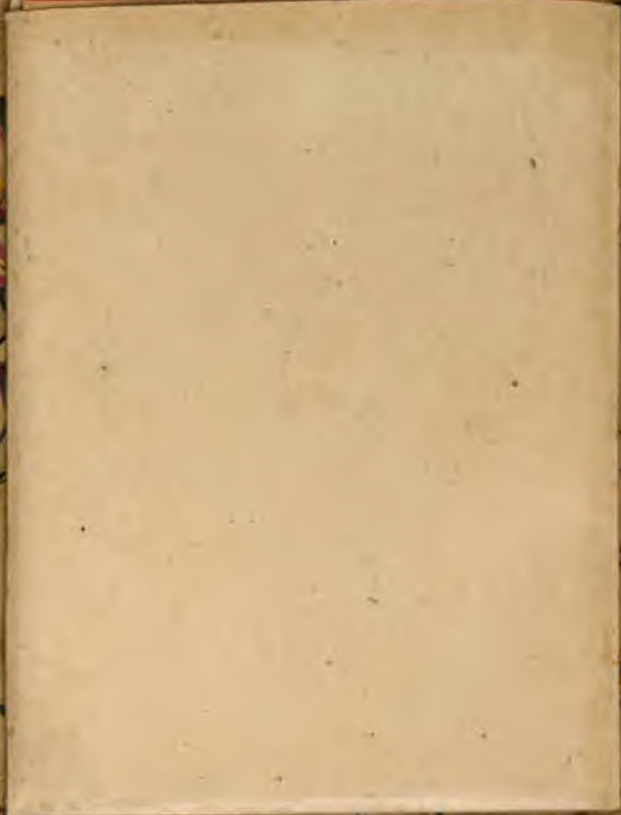
- densimètre, I, 119; d'un compteur à gaz, I, 144; d'un baromètre anéroïde, I, 124; des thermomètres, I, 172 et 173.
- Vernis*, I, 51.
- Verre*. Dessiner et écrire sur le verre, I, 36, 42 et 43; travail du verre, I, 27; couper un tube de verre ou un flacon, I, 29 et I, 40; border un tube, I, 30; souffler une boule, I, 32; souder le verre au platine, I, 33; soudure de boules et de tubes, I, 34; argenture du verre, I, 37; coller du papier d'étain sur le verre, I, 39; couper un carreau, I, 40; percer un trou dans du verre, I, 48; roder le verre, I, 50; soudure métallique du verre, I, 50; qualités des différents verres, I, 51.
- Vibrations* tournantes, II, 2; vibrations forcées, II, 2 et 8; vibrations composées et figures de Lissajous, II, 12; vibrations sonores, II, 13; des corps solides, des diapasons, II, 13; les compter, II, 27; vibrations des tuyaux sonores, II, 28 à 30; vibrations forcées des cordes vibrantes, II, 36; vibrations longitudinales des fils et des verges, II, 38; vibrations transversales des verges, II, 39.
- Viscosité superficielle* des liquides, I, 154.
- Vitesse* dans une veine liquide, I, 145; dans un courant d'air, I, 148; vitesse limite dans la chute des corps, I, 149; mesure stroboscopique d'une vitesse, II, 367; vitesse du son, II, 20; sa mesure par les tuyaux sonores, II, 33; influence du mouvement de la source, II, 21; mesure directe de la vitesse du son, II, 20; sa mesure par les interférences, II, 21; valeurs numériques, II, 408; vitesse de la lumière, II, 411.
- Volumes*. Mesures des volumes, I, 65.
- Volume focal* d'un objectif photographique, II, 82.
- Voltmètres*, II, 250.
- Wattmètre*, II, 349, 387 et 388.
- Zéro* des thermomètres, I, 173.

FIN.

Abraham

.aB8

Recueil d'ouvrages



PHYSICS AND MATH.



b89048366629a